



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ ŠÍŘENÍ SLIZNIČNÍ VLNY U LIDSKÝCH HLASIVEK

COMPUTATIONAL MODELLING OF MUCOSAL WAVE PROPAGATION IN HUMAN VOCAL FOLDS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Vintř

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Švancara, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Lukáš Vintř
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Pavel Švancara, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výpočtové modelování šíření slizniční vlny u lidských hlasivek

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tvorba lidského hlasu je založena na interakci proudem vzduchu rozkmitaných hlasivek s akustickými procesy ve vokálním traktu. Detailní studium tohoto mechanismu je důležité pro pochopení tvorby hlasu u zdravých lidí a především pak u pacientů trpících hlasovými poruchami. Cílem práce je provést rešerši literatury týkající se výpočtového modelování a experimentálního měření šíření slizniční vlny. Dále pak s využitím metody konečných prvků vytvořit rovinný model hlasivek a na něm analyzovat vliv materiálových parametrů a tlumení jednotlivých vrstev na šíření slizniční vlny.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Na základě literatury stručně popište funkci hlasivek a biomechaniku tvorby lidského hlasu.
- 2) Na základě literatury uveďte přehled současných přístupů při výpočtovém a experimentálním modelování šíření slizniční vlny.
- 3) Vytvoření rovinného modelu jedné hlasivky s využitím metody konečných prvků.
- 4) Analýza vlivu materiálových parametrů a tlumení jednotlivých vrstev hlasivek na šíření slizniční vlny.

Seznam doporučené literatury:

TITZE, I. R. The Myoelastic-Aerodynamic Theory of Phonation. Denver and Iowa City: National Centre for Voice and Speech, 2006. ISBN 0874141567.

ŠVEC, J. Studium mechanicko-akustických vlastností zdroje lidského hlasu. disertační práce, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci, 1996.

ZIENKIEWICZ, O.C. a R.L. TAYLOR. The Finite Element Method. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. ISBN 1856176304.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem práce je na modelu hlasivky provést analýzu vlivu materiálových parametrů jednotlivých vrstev tkáně hlasivek na šíření slizniční vlny. Nejdříve je na základě literatury uveden stručný přehled současných přístupů při experimentálním a výpočtovém modelování šíření slizniční vlny. Dále je pak pomocí modální analýzy zkoumán vliv modulu pružnosti v tahu epitelu a povrchové laminy proprii na vlastní frekvence a tvary kmitů. Šíření slizniční vlny bylo následně analyzováno pomocí přechodové analýzy jako odezva hlasivky na rázové buzení silou na spodní část hlasivky. Byl vyhodnocován vliv materiálových parametrů na amplitudu a rychlost šíření slizniční vlny po povrchu hlasivky.

V závěru práce je uvedeno doporučení, dle zaznamenaných výsledků, použít nižší moduly pružnosti v tahu povrchové laminy proprii v modelech s interakcí s proudem vzduchu, protože je zde mnohem výraznější šíření slizniční vlny odpovídající chování skutečných lidských hlasivek.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to analyze the influence of material parameters of individual layers of vocal cord tissue on the propagation of mucosal waves on the vocal cord model. First, a brief overview of current approaches in experimental and computational modeling of mucosal wave propagation is given on the basis of the literature. Furthermore, the influence of the modulus of elasticity in the tensile epithelium and the surface lamina of propria on the natural frequencies and shapes of oscillations is investigated by means of modal analysis. Mucosal wave propagation was then analyzed using transient analysis in response to the vocal cords to shock excitation by force on the lower part of the vocal cords. The influence of material parameters on the amplitude and speed of mucosal wave propagation over the vocal cord surface was evaluated.

In the end of this thesis, the recommendation is given, according to the recorded results, to use lower modulus of elasticity in tension of the surface lamina propria in models with interaction with air flow, because there is much more pronounced mucosal wave propagation corresponding to the behavior of real human vocal cords.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hlasivky, slizniční vlny, metoda konečných prvků, povrchová lamina propria, přechodová analýza

KEYWORDS

Vocal folds, mucosal wave, finite element method, superficial lamina propria, transient analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VINTR, Lukáš. *Výpočtové modelování šíření slizniční vlny u lidských hlasivek*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124911>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Pavel Švancara.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ ŠÍŘENÍ SLIZNIČNÍ VLNY U LIDSKÝCH HLASIVEK** vypracoval samostatně pod vedením svého vedoucího práce Ing. Pavel Švancary, Ph.D. s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, které jsou uvedeny na konci této práce.

.....
Datum

.....
Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu práce Ing. Pavlu Švancarovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl, při vypracování bakalářské práce. Také mu děkuji za časté konzultace problémů, kontrolu a korekci výpočtů spojené s bakalářskou prací.

Obsah

1	ÚVOD.....	12
2	PRINCIP TVORBY LIDSKÉHO HLASU	13
	2.1 STRUKTURA HRTANU	14
	2.1.1 <i>Struktura hlasivek</i>	14
	2.1.2 <i>Svalstvo hrtanu</i>	15
	2.1.4 <i>Kostra hrtanu</i>	17
	2.2 POHYB HLASIVEK.....	18
	2.3 TEORIE ZDROJE FILTRU	20
3	SLIZNIČNÍ VLNA – PŘEHLED ČLÁNKŮ Z LITERATURY	22
	ÚVOD K SLIZNIČNÍ VLNĚ	22
	VIBRAČNÍ POHYB HLASIVEK	24
	<i>Morfologie lidských hlasivek</i>	26
4	PŘEHLED VÝPOČTOVÝCH MODELŮ	29
	4.1 HMOTOVÉ MODEL Y	29
	4.1.1 <i>Jedno-hmotový model</i>	29
	4.1.2 <i>Ewaldova píšťala</i>	29
	4.2 N-HMOTOVÉ MODEL Y	30
	4.2.1 <i>Dvou-hmotový model</i>	30
	4.2.2 <i>Troj-hmotový model</i>	31
	4.2.3 <i>Model slizniční vlny</i>	32
	4.2.4 <i>FEM model kmitajících hlasivek</i>	32
5	MODEL Y PROUDĚNÍ.....	33
	5.1 TUHÝ MODEL HLASIVEK – PROUDĚNÍ	33
	5.2 MODEL NESTACIONÁRNÍHO PROUDĚNÍ VZDUCHU	34
6	3D VÝPOČTOVÉ MODEL Y	36
	6.1 PML 3D MODEL VOKÁLNÍHO TRAKTU A PROSTORU HLAVY	37
7	RYCHLOST ŠÍŘENÍ VLN V PEVNÝCH LÁTKÁCH	39
	7.1 PODÉLNÉ VLN Y	39
	7.2 PŘÍČNÉ VLN Y V PEVNÝCH LÁTKÁCH	40
	7.3 OHYBOVÉ VLN Y	41
	7.4 RAYLEIGHOVY POVRCHOVÉ VLN Y	41
8	MODÁLNÍ ANALÝZA	43
	8.1 MODEL GEOMETRIE HLASIVEK.....	45
	8.2 MODEL MATERIÁLU VRSTEV HLASIVEK	46

8.3	VYTVOŘENÍ SÍTĚ TKÁNĚ HLASIVEK	47
	VÝSLEDKY MODÁLNÍ ANALÝZY	49
9	PŘECHODOVÁ ANALÝZA.....	57
9.1	STANOVENÍ KOEFICIENTŮ PROPORCIONÁLNÍHO TLUMENÍ.....	57
9.2	VLIV VELIKOSTI ČASOVÉHO KROKU	60
9.3	VÝSLEDKY PŘECHODOVÉ ANALÝZY	64
9.4	HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	67
10	ZÁVĚR	76
11	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	78
12	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	81

1 ÚVOD

Tvorba lidského hlasu je založena na interakci s proudem vzduchu rozkmitaných hlasivek s akustickými procesy ve vokálním traktu. Detailní studování tohoto mechanismu je podstatné pro pochopení problému tvorby hlasu jak u zdravých lidí, a poté především u těch trpících hlasovými poruchami. Cíl práce je provést rešerši literatury, která se týká výpočtového modelování a následně experimentálního měření šíření slizniční vlny u lidských hlasivek. Poté za pomoci metody konečných prvků (MKP), která bude provedena v programu ANSYS, vytvořit rovinný model hlasivek a na něm následně analyzovat vliv měnících se materiálových parametrů a tlumení jednotlivých vrstev na šíření slizniční vlny. Snahou bude naladit materiálové parametry tak, aby šíření slizniční vlny v modelech s interakcí s proudícím vzduchem vyvíjených na Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky lépe odpovídalo chování skutečným lidským hlasivkám

Na základě literatury bude stručně popsána funkce hlasivek a biomechanika tvorby lidského hlasu, bude uvedený přehled současných přístupů a metod měření při výpočtovém modelování šíření slizniční vlny, rovněž také model vokálního traktu a prostoru kolem hlavy.

Dále pak bude vytvořen rovinný model jedné hlasivky za využití metody konečných prvků, na kterém proběhne analýza vlivu materiálových parametrů a tlumení jednotlivých vrstev hlasivek na šíření slizniční vlny.

Modální analýza modelu bude provedena pro volné netlumené kmitání. Touto analýzou za pomoci změny materiálových parametrů bude vyladěna frekvence hlasivek tak, aby odpovídali frekvenci kmitů na skutečných hlasivkách.

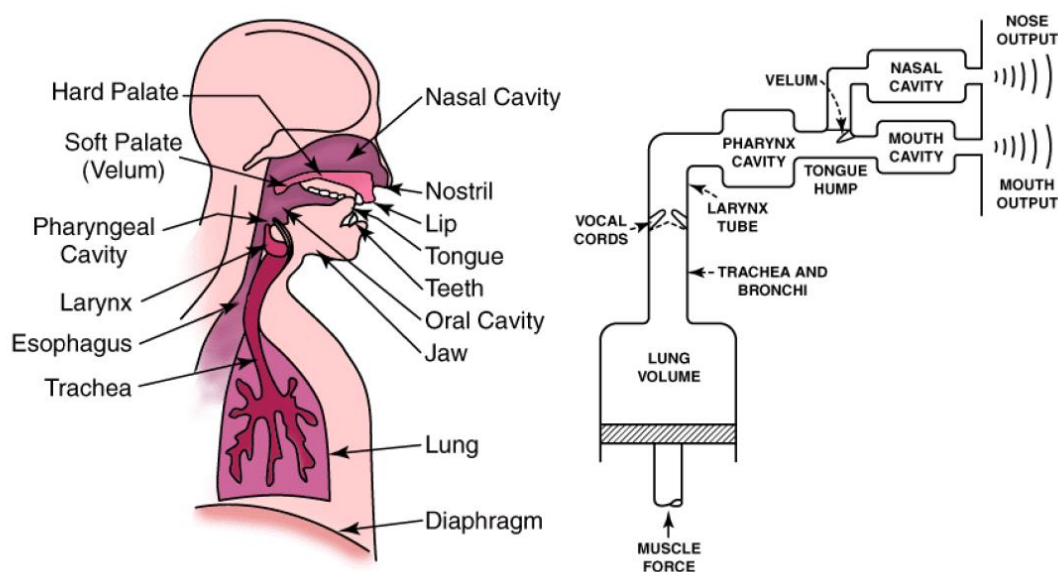
Do obsahu výpočtů transientní analýzy bude rovněž zahrnut test časové kroku na pozdější výpočty amplitudy a rychlosti šíření slizniční vlny pro různé materiálové charakteristiky.

2 PRINCIP TVORBY LIDSKÉHO HLASU

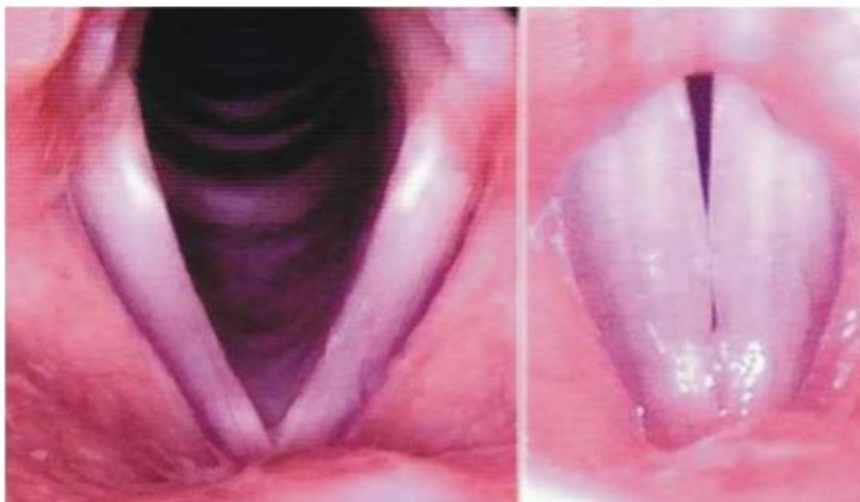
V počáteční fázi dýchání se hlasivky nacházejí v počáteční poloze, tedy odtažené od sebe. Ve chvíli, kdy začneme mluvit, hlasivky se přiblíží a dojde ke kontaktu přitlačením. V této chvíli dochází k aktivaci hrudních svalů, které, mimo jiné, regulují objem vzduchu v plicích [11]. Plíce jsou umístěny v hrudní dutině, která se odděluje od břišní dutiny bránicí.

Napínáním hrudi dochází k vytlačování vzduchu do průdušek ve statické podobě, na obrázku je tento proces zjednodušen jakožto píst pohybující se ve válci.

Přes průdušky se vzduch ve statické podobě šíří do průdušnice a postupně se dostane až k hrtanu, kde se nacházejí právě hlasivky. Zde dojde ke kumulaci tlaku, a po dosažení správné úrovně tohoto tlaku, dojde k otevření. Díky tomuto jevu poklesne velikost tlaku pod hlasivkami, z čehož plyne, že se hlasivky opětovně uzavřou. Tento proces probíhá cyklicky s určitou frekvencí a tím dochází k rozkmitání hlasivek a výsledkem vibrujících hlasivek je zdrojový hlas. Zdrojový hlas je transformován a utvářen. Začíná právě v rozvibrovaných hlasivkách postupuje přes hrtan, hltan, a nakonec ústní dutinu, výsledkem tohoto procesu je tvorba jednotlivých hlásek (viz obr.1) [11]. Důležité je dodat, že výsledná podoba záleží i na postavení zubů a jazyku (jakožto artikulační nástroje).



Obr.1 Schéma akustického systému [20]



Obr.2 Poloha hlasivek dýchání – fonace [21]

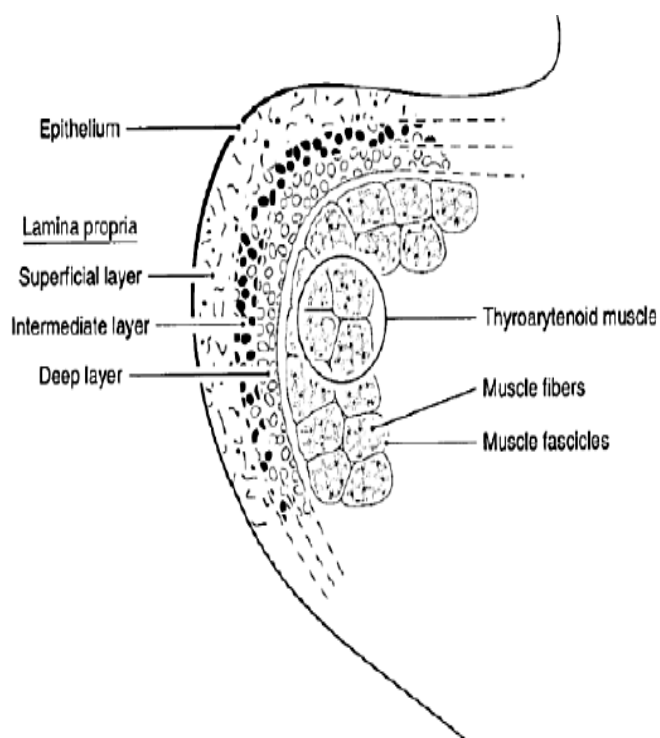
2.1 Struktura hrtanu

Hrtan se obecně rozděluje na tvrdou tkáň, která je tvořena chrupavčitou kostrou a měkkou tkání, kde spadají vazy, sliznice a svalstvo. A hlasivky jsou poté součástí hrtanu [1]. Na Obr.2 vidíme polohu hlasivek při dýchání, a při fonaci (dýchání vlevo, fonace vpravo. Mezera (štěrbina), která se utvoří mezi hlasivkami při dýchání, kdy jsou hlasivky otevřené, se nazývá *glottis*. Pohyby hlasivek lze regulovat pomocí množství svalů, které jsou upnuty na hrtanové chrupavky.

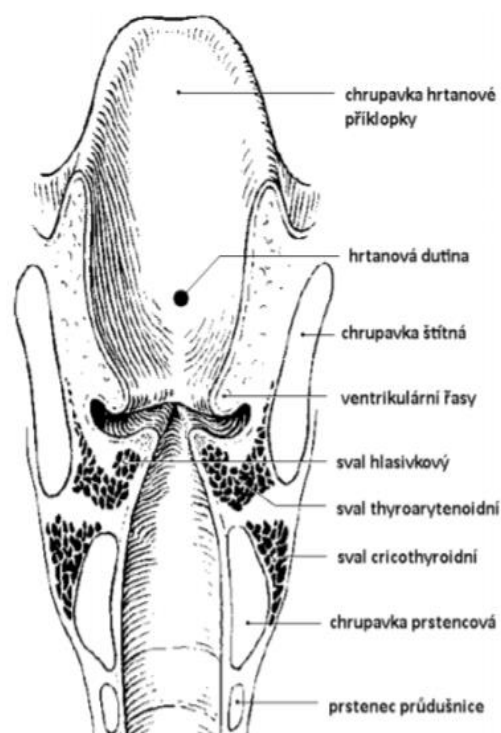
2.1.1 Struktura hlasivek

Mezi chrupavkami a chrupavkou štítnou se nacházejí hlasivky. Nad nimi jsou ventrikulární řasy (nepravé hlasové vazy). V horní části hrtanu nalezneme chrupavku hrtanové příklopky, která slouží k uzavírání hrtanového prostoru. Hlasivky a jejich struktura je v odborných textech popsána jako třívrstvý model skládající se z povrchové, střední a hluboké vrstvy. Nejpřesnější model vytvořil profesor I. R. Titze. Tento model je pětivrstvý (obr.3), kde další dvě vrstvy mimo tři již zmíněné přidal svalovou (thyroarytenoidmuscle) a epitelu (Epithelium) [2]. Pod Epitelem je měkká tkáň, která se svými vlastnostmi velmi podobá tekutině, nazývá se *superficial layer*. *Intermediate layer* neboli střední vrstva je tvořena drobnými elastinovými vlákny. Tato vlákna se svými vlastnostmi nejvíce podobají vláknům gumovým a většinou jsou orientována v podélném směru hlasivek. *Deep layer*, neboli hluboká vrstva je naopak tvořena především kolagenovými vlákny, která jsou svými vlastnostmi podobná bavlněným vláknům a jsou zcela nepoddajná [1].

Největší část hlasivek tvoří *thyroarytenoidní sval*, který je uložen nejhlouběji pod samotným povrchem hlasivek.



Obr. 3 Model materiálu hlasivek podle I. R. Titze [1]



Obr.4 Řez hrtanem [1]

2.1.2 Svalstvo hrtanu

Svalstvo hrtanu můžeme rozdělit na dvě části, vnější a vnitřní. Vnitřní svalstvo propojuje hrtanové chrupavky, které jsou důležité z hlediska tvorby hlasu. Vnější svaly spojují hrtan s okolím, vnitřní svalstvo je pak rozděleno na adduktory a abduktory. *Abduktory* otevírají svalovou štěrbinu naopak *adduktory* ji zavírají. Na obr.5 vidíme nejvýznamnější svaly vnitřního svalstva hrtanu [3].

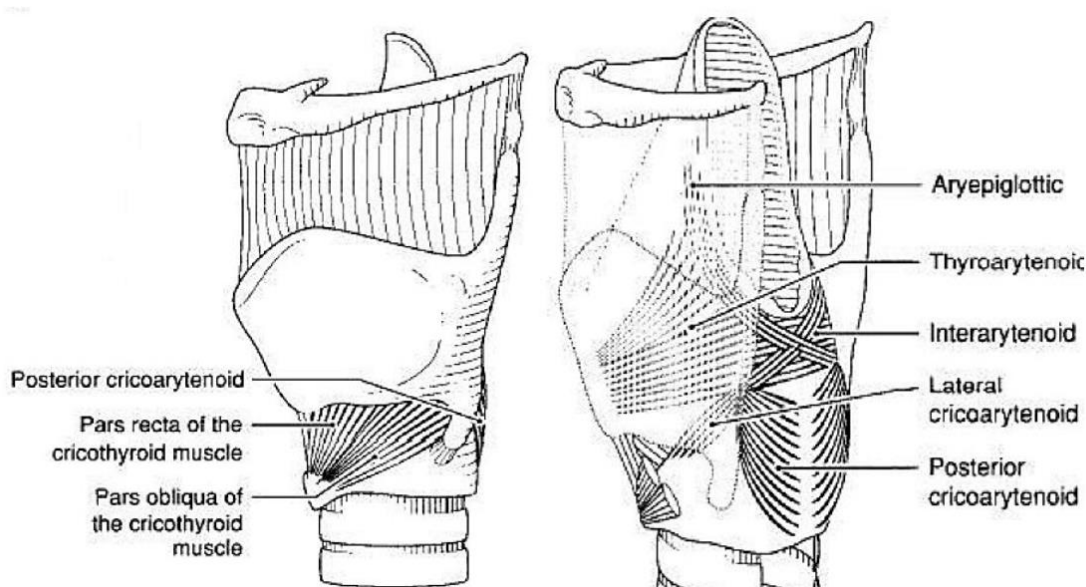
Musculus cricothyroideus – tento sval se upíná mezi chrupavkou štítnou a chrupavkou prstencovou a je rozdělen na dva svazky, na přímou a šikmou část. Vlivem kontrakce může dojít k přitažení chrupavky prstencové ke štítné a tímto způsobem dochází k napínání a prodlužování hlasivek. Tento sval je také klíčový pro kmitání hlasivek [3].

Musculus cricoarytenoideus posterior – sval tvořený párem, který je upevněn mezi chrupavkou hlasivkovou a chrupavkou prstencovou. Tento sval slouží k rozevírání hlasivkové mezery a jeho funkce je opačná k funkci svalu *Musculus cricoarytenoideus lateralis* [3].

Musculus cricoarytenoides lateralis – upíná se od svalového výběžku chrupavky arytenoidní k hornímu okraji chrupavky prstencové. Tímto svaem je způsobená rotace chrupavky arytenoidní, z toho důvodu se hlasivkový výběžek posouvá do středu a přitlačuje samotné hlasivky k sobě, a zároveň působí jako adduktor [3].

Musculus arytenoideus – tento sval propojuje arytenoidní chrupavky. Dělí se na párový sval (*Musculus arytenoideus obliquus*) a nepárový sval (*Musculus arytenoideus transversus*). Při kontrakci těchto svalů se arytenoidní chrupavky přibližují. V důsledku toho se štěrbina mezi těmito dvěma chrupavkami uzavírá (konkrétně část *glottis*). Uzavřením glottis se zamezuje unikání vzduchu z plic mimo část, kde hlasivky vibrují [3].

Musculus thyroarytenoideus – tento sval se nazývá hlasivkový a jde opět o sval párový, který se upíná od chrupavky hlasivkové k štítné chrupavce. Tento sval lze rozdělit na vnější a vnitřní svalový svazek. Internus (vnitřní) dopíná sval při fonaci. Externus (vnější) pak zkracuje sval ve vnějším směru. Hlasivkový sval má důležitou roli při naladění výšky tonu hlasivek, a při nastavení hlasových rejstříků [3].



Obr.5 Vnitřní svalstvo hrtanu [3]

2.1.4 Kostra hrtanu

Součástí kostry hrtanu je jen jedna kost, co se nejvíce podílí na funkci samotných hlasivek, a to jazylka. Součástí hrtanu jsou dále chrupavky, a to chrupavka prstencová a chrupavka štítná. Obr.6 zobrazuje dva pohledy na kostru hrtanu [4].

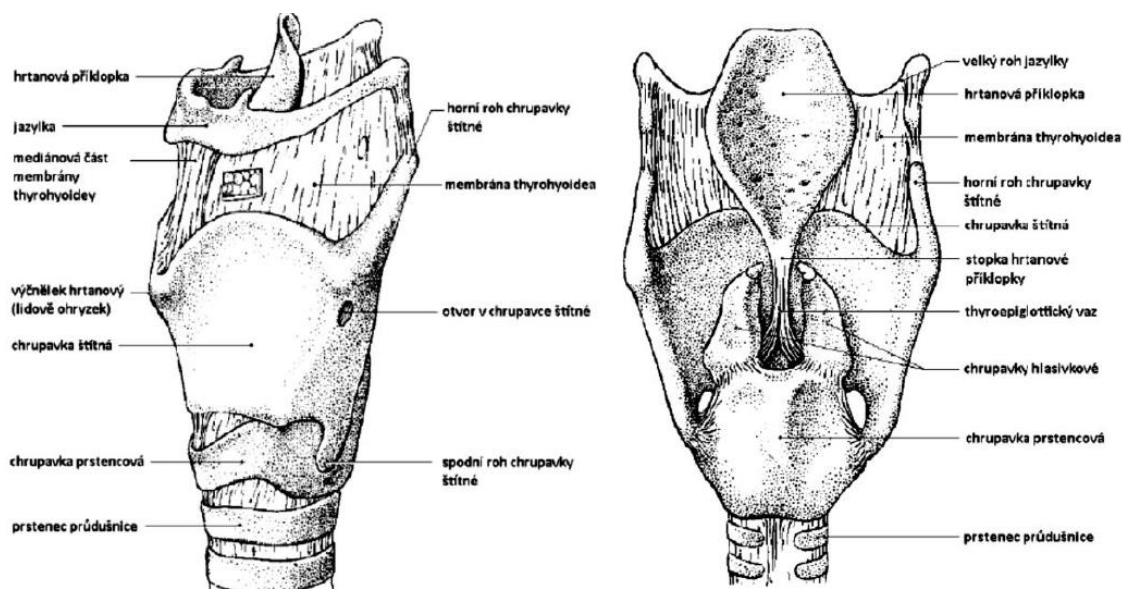
Jazylka – Upíná se na ni velké množství hrtanových svalů, umožňují tak zachycení hrtanu a jeho celkový pohyb. Jazylka jako taková není považována za přímou součást hrtanu, ale je jedinou kostí v celé jeho kostře [4].

Popis chrupavek:

Chrupavka prstencová – má dvě kloubní plochy v zadní horní části, které dosahují na chrupavky hlasíkové a dole je spojena s průdušnicí. [4].

Chrupavky hlasíkové – tyto chrupavky jsou umístěny v zadní části na rozšířené části chrupavky prstencové a jsou jen částečně pohyblivé. Mohou se různým způsobem natáčet, přibližovat se, případně měnit sklon. Spojení s prstencovou chrupavkou je nesmírně komplikované, dodnes nebylo zcela popsáno stejně tak jako způsob svalového a nervového ovládání [2].

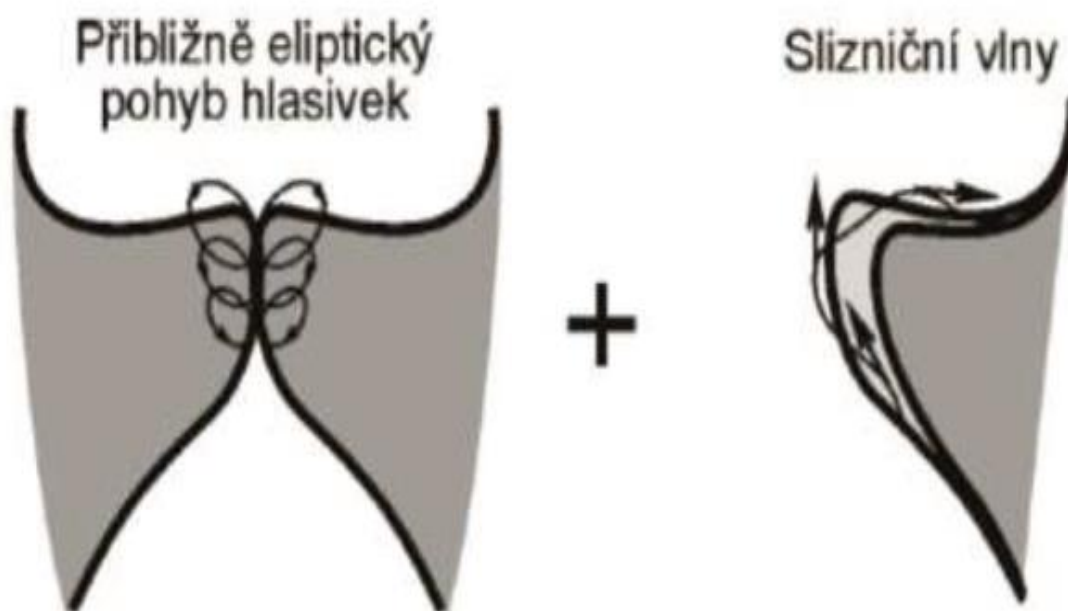
Chrupavka štítná – také se lidově nazývá ohryzek. Je tvořena ze dvou plochých destiček, v přední části se spojují v hranu. V zadní části tyto destičky vybíhají do horního a dolního rohu chrupavky štítné. Horní je propojen jazylkou a dolní je kloubně spojen s prstencovou chrupavkou [4].



Obr. 6 Kostra hrtanu s popisem, vlevo pohled z boku, vpravo pohled zezadu na kostru hrtanu [4]

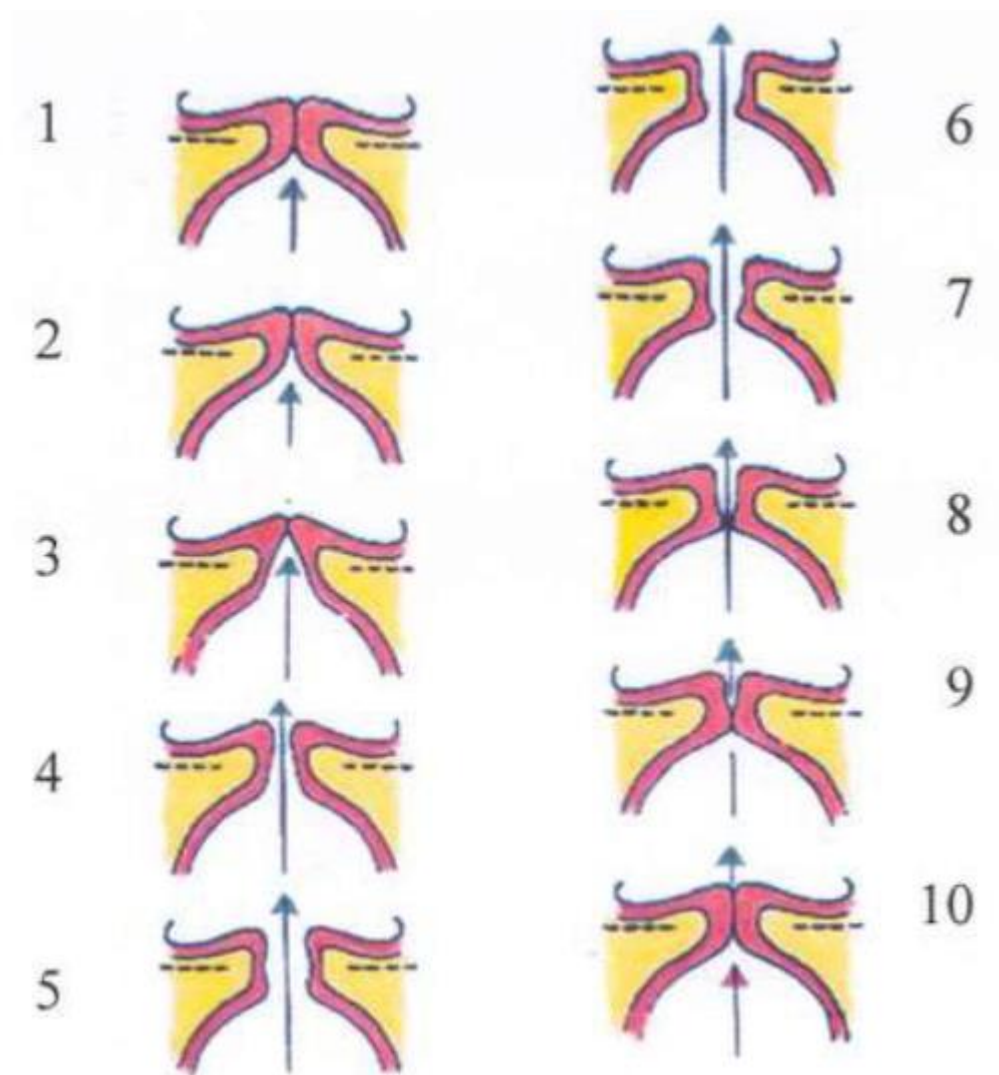
2.2 Pohyb hlasivek

Hlasivky jsou během fonace rozkmitány proudem vzduchu. Frekvence kmitání hlasivek se liší v důsledku pohlavních rozdílů u mužů a žen. U mužů nabývají hodnot (70-500 Hz) a u žen hodnot (140-1000 Hz). Přičemž pohyb má trajektorii připomínající elipsu [1]. Vlivem interakce se vzduchem se k tomuto pohybu přidává vlnitý pohyb slizničního povrchu. Tento vlnitý pohyb je nazýván slizniční vlna nebo také posun hrany. Schéma pohybu hlasivek je zobrazeno na obr.7.



Obr.7 Rozložení pohybu hlasivek [22]

Následující obr.8 představuje pohyb hlasivek ve frontálním řezu, znázorněný v deseti fázích. Hlasivky během pohybu dosahují konvergentního postavení (poloha hlasivek při otvírání) a divergentního postavení (poloha hlasivek při zavírání)



Obr.8 Zobrazení pohybu hlasivek ve frontálním řezu [31]

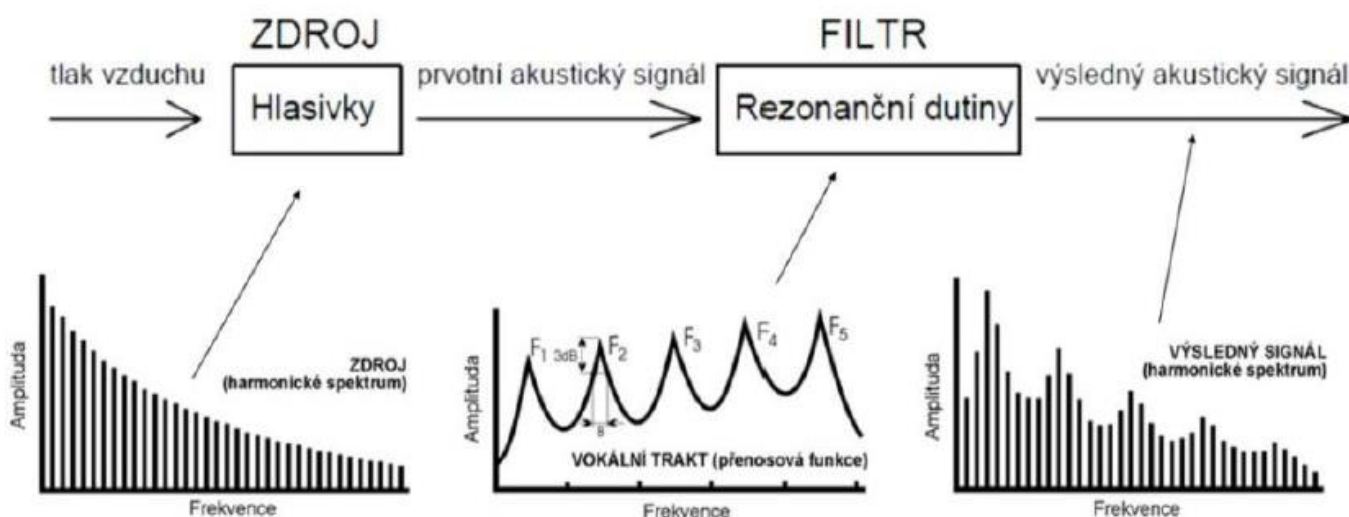
- 1) Hlasivky ve fonačním postavení
- 2) Působením sub-glotického tlaku vzduchu na spodní okraj hlasivek k jejich oddalování.
- 3) Hlasivky zaujímají konvergentní tvar.
- 4) Oddálené hlasivky. Hlasivkovou štěrbinou uniká proud vzduchu
- 5) Fáze maximálního rozevření hlasivek
- 6) Spodní okraje hlasivek se přibližují
- 7) Hlasivky v divergentním postavení
- 8) Kontakt mezi spodními částmi hlasivek
- 9) Uzavření hlasivkové štěrbiny zespodu
- 10) Hlasivky se dostávají zpět do výchozího postavení

2.3 Teorie zdroje filtru

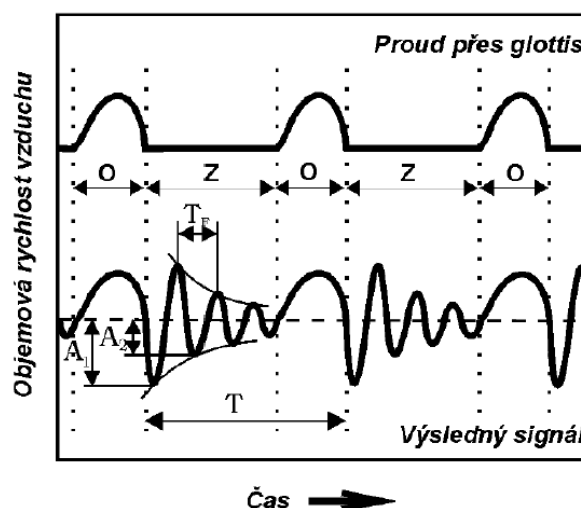
Tvorba hlasu probíhá ve dvou fázích. V první fázi je kmitáním hlasivek generovaný první akustický signál a ve druhé dochází k přetvoření prvního akustického signálu v rezonančních dutinách supra-logického traktu. Tyto rezonanční dutiny hrají roli akustického filtru a dotváří výsledný signál. K rezonanci v dutinách dochází tak, že po uzavírací fázi dojde k poklesu tlaku nad hlasivkami (což je způsobeno setrvačností proudu nad uzavřenými hlasivkami – tak se vzduch začne rozpínat). Tento pokles tlaku vybudí rezonanci dutin o charakteristické frekvenci pro dané nastavení dutin. Tyto frekvence závisí na nastavení dutin, jsou tedy nezávislé na frekvenci kmitání hlasivek. Kmitání dutin je rychle utlumeno a k opětovnému rozkmitání dochází až znovu po opětovném uzavření hlasivek při dalším cyklu [22].

Rezonančním frekvencím dutin se říká formanty, formují souhlásky (vokály). To znamená, že pro rozdílné nastavení dutin vznikají rozdílné formanty a také charakteristicky rozdílné vokály.

Zde na obrázku 9 je zobrazeno schéma soustavy zdroj-filtr.



Obr.9 Schéma soustavy-zdroj-filtr



Obr.10 Vliv poklesu tlaku supra-logického prostoru na buzení [22]

Vliv sub-logického prostoru (viz obr.10) má tedy význam spíše při hlasivkách v poloze otevřené, kdy může ovlivňovat tvar pulzů přes hlasivky. V případě, že jsou hlasivky uzavřeny, je samotnými hlasivkami izolován od supra-logického prostoru z čehož plyne, že jeho vliv v této fázi lze zanedbat [22].

Další důkaz prvku řeči jsou souhlásky. Je ovšem třeba si uvědomit, že na vzniku souhlásek se podílejí i jiné akustické zdroje, jako jsou například rty, jazyk, zuby apod. Každá souhláska má své charakteristické formanty, které se odlišují od jiných.

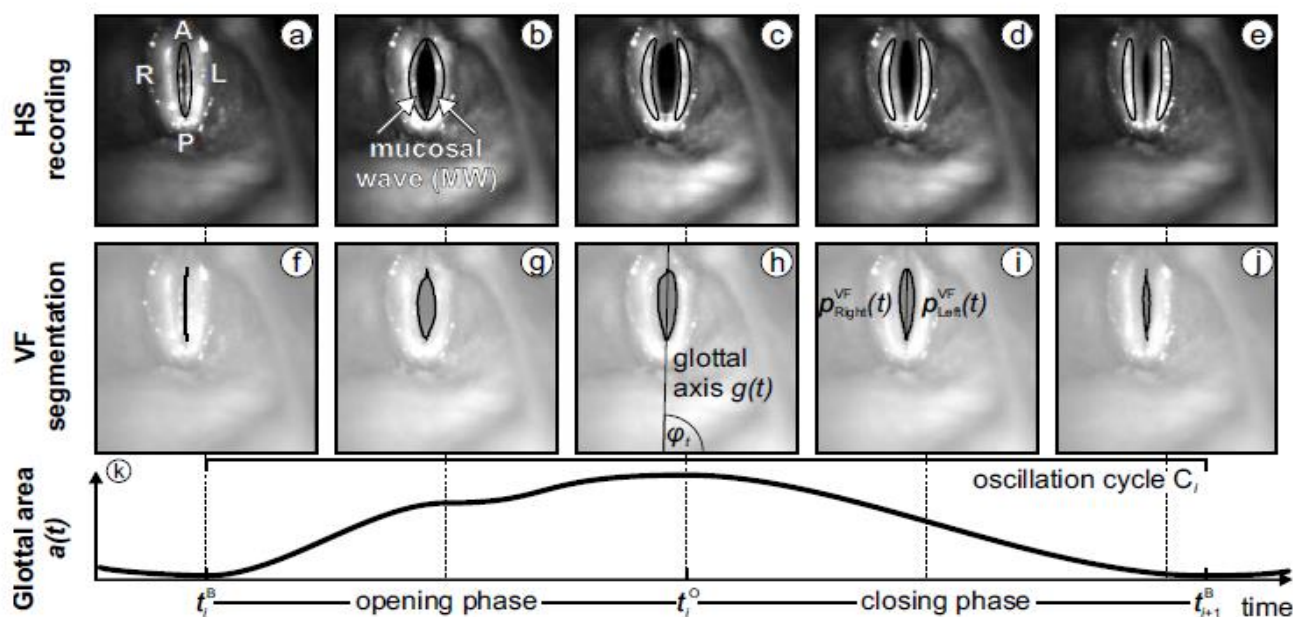
3 SLIZNIČNÍ VLNA – PŘEHLED ČLÁNKŮ Z LITERATURY

Úvod k slizniční vlně

Hlas hraje významnou roli v našem životě, protože představuje hlavní prostředek člověka ke sdělování informací. Aby bylo možné odlišit normální uspořádání hlasů od neuspořádaných, provádí se různé zkoušky a přístupy, které jsou prováděny klinicky.

Digitální vysokorychlostní video-endoskopie je nejprůkaznější technikou, protože umožňuje důkladné prozkoumání celkového vzorce hrtanového pohybu. Dynamika zdravých hlasivek je primárně identifikována na základě pravidelných a symetrických vibračních režimů. Další relativní vlastnost je vlnový pohyb povrchové sliznice pokrývající *musculus vocalis*, vyskytující se ve vertikální a laterální dimenzi. Tento projev pohybu se označuje jako šíření slizniční vlny a obvykle se hodnotí během klinické hlasové diagnostiky. Jeho existence a velikost poskytuje cenné informace o propojení mezi sliznicí a pod ní ležícím svaelem.

Tento termín vytvořil Matsushita. Po sobě jdoucí hlasové záhyby připomínají vlny v tekutém médiu. Slizniční vlna je iniciována sub-glottálním tlakem proti dolnímu záhybu. Tento tlak otevře rty a pokračuje směrem nahoru, dokud se horní rty neoddělí.



Obr. 11 Jednotlivé pozice hlasivek zobrazené endoskopií [15]

Je všeobecně známo, že slizniční vlna a její aktivita je užitečným ukazatelem kvality produkce hlasu a samotné jeho přítomnost. Důležitým vizuálním vodítkem aktivity slizniční vlny je přítomnost zvýraznění odrazů způsobené slizničními otřesy, které se během fonace pohybují laterálně přes povrch. K nejnovějším měřením se klinické hodnocení šíření slizniční vlny provádí subjektivně, a tudíž trpí variabilitou [15]. Pro spolehlivé a validní měření bylo navrženo několik technik objektivní analýzy. Na obr.11 můžeme vidět pozice hlasivek zobrazené endoskopií.

Nejprve se hlasivky otevírají z téměř uzavřeného stavu (obr.11 a) Povrchní sliznice se pohybuje pryč s bočním posuvem a tvoří otřesy slizniční vlně, které lze vidět podle jasného zvýraznění podél okraje (obr.11 b). Přibližně v okamžiku, kdy vokální trakt dosáhne stavu maximálního otevření (obr.11 c) se stlačená slizniční vlna odpojí od okraje vokálního traktu [15].

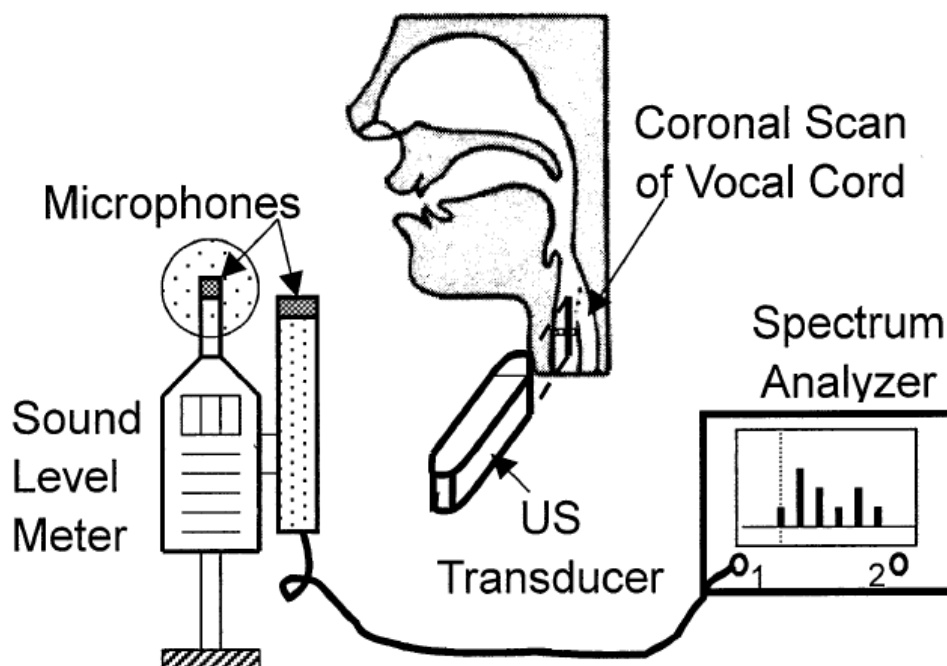
Zatímco vokální trakt pohybuje zpět do své mediální polohy, slizniční vlna se dál pohybuje v bočním směru samovolně (obr.11 d) před vyrovnaním slizniční vlny (obr.11 e). V následujícím oscilačním cyklu tento dynamický proces začíná znovu.

Zachycení dynamiky slizniční vlny zpočátku vyžaduje detekci polohy vokálního traktu pro každou z nich viditelné na (obr.11 f). Tato technika je zvláště vhodná pro segmentace kmitů vokálního traktu, s pomocí algoritmu tato metoda identifikuje polohu připojené hrany vokálního traktu (obr.11 g) [15]. Na základě segmentovaného globálního obrysu je stanovena střední čára $g(t)$ (obr.11 h), která rozděluje vokální trakt na dvě strany.

Vibrační pohyb hlasivek

Autoři článku [32] uvedli důležitost vibračního pohybu hlasivek při fonaci. Vyvinuli neinvazivní techniku pro kvantifikaci rychlosti lidské slizniční vlny pomocí Dopplerova barevného zobrazování. Během fonace pohyb rozhraní vytváří jedinečný vzor barevných artefaktů, které pomáhají identifikovat skutečné umístění vokálního traktu. Ve studii byla zjištěna vibrační amplituda, frekvence, hustota hmoty a akustická impedance měkkých tkání, které dominují ve tvorbě barevných artefaktů. Na základě modelu konečných řetězců s pevnými konci autoři práce [32] odhadli průměrnou rychlost slizniční vlny pro deset dospělých dobrovolníků (šest mužů a čtyři ženy, ve věku třicet-čtyři a třicet-pět let). Autoři zjistili, že rychlost slizniční vlny pro muže kolísá od 2,1 do 10 m/s, a to ve frekvenčním rozsahu od 85 do 310 Hz. U žen byly hodnoty obvykle vyšší, pohybovaly se od 5,0 do 16,5 m/s, a to ve frekvenčním rozsahu od 180 do 480 Hz.

Rychlost slizniční vlny lineárně rostla s frekvencí a nebyl pozorován rozdíl v tuhosti sliznice vlivem pohlaví. Na následujícím obrázku 12 je vidět nastavení a vybavení pro měření. Měření na subjektech bylo prováděno v sedě. Převodník byl umístěn na přední část hrtanu, aby se získal koronální pohled na vokální trakt [32]. Mikrofony byly použity pro monitorování základní frekvence hlasu.

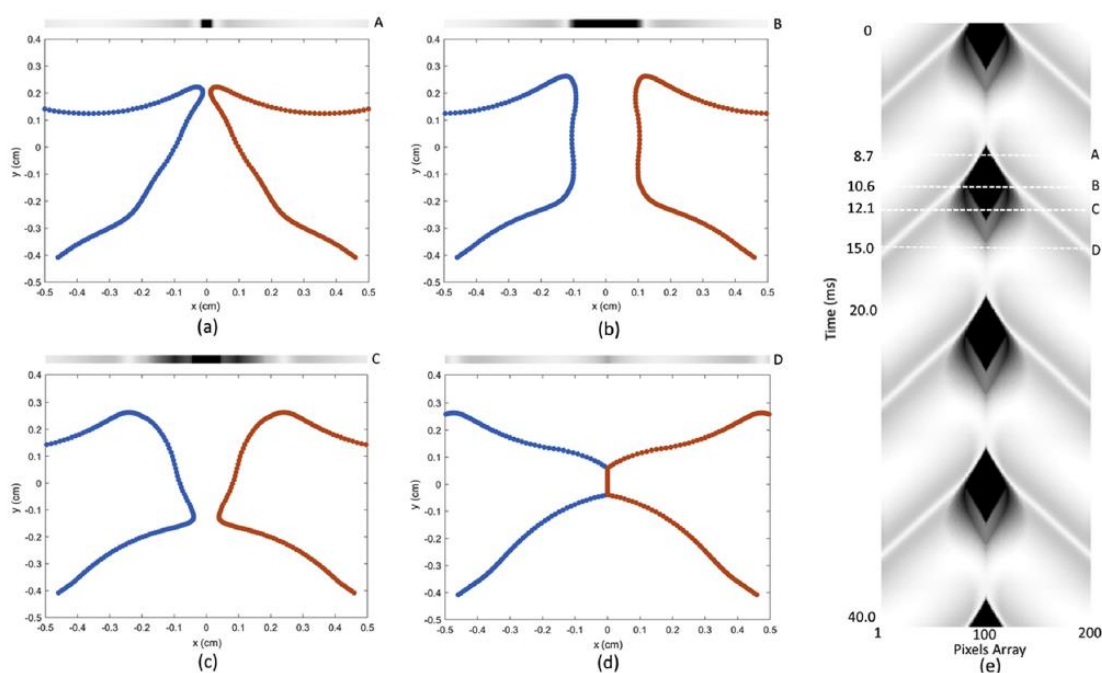


Obr. 12 Schéma měření [32]

Slizniční vlna může být měřena nepřímým zobrazováním techniky jako je EGG, PGG a ultrazvukové a vizualizační techniky, které zahrnují videokymografii (VKG), stroboskopii a vysokorychlostní digitální zobrazování (HSDI) [33]. Výhody a nevýhody těchto metod, rovněž jejich klinická použitelnost, jsou diskutovány. Zlepšení metod, kombinace technik a kvantifikace slizniční vlny jsou navrženy pro parametry v patologických hlasivkách.

Autoři práce [34] za účelem prozkoumání vibračního vzoru, zejména vibrační fáze tkáně pod sliznicí hlasivek byla navržena metoda zvaná ultrasonografie vyvolaná elektro-glottogramem. Ultrazvukové obrazy vibrací hlasového zvuku jsou získány v koronální rovině od pěti dospělých subjektů během fonace. Rychlost se získá použitím metody odhadu pohybu. Výsledky ukazují, že fáze vibrací je rozdílná mezi tkáněmi na různých místech pod hlasivkou. Sliznice má za následek mechanickou vlnu, která se pohybuje nahoru rychlostí od 0,720 m/s do 1,826 m/s

Bylo jisté, že slizniční vlny jsou důležité pro hodnocení vibrací vokálního traktu [35] v laryngologickém vyšetření. Kymografické zobrazování odhaluje různé funkce slizničních vln. V práci [35] je uveden kinematický model, který simuluje slizniční vlna na lidských hlasivkách. Geometrie vokálního traktu je založena na parametricky nastavitelném M5 modelu. Kinematické pravidlo se používá pro simulaci šíření slizniční vlny od spodní části hlasivek nahoru a laterálně přes horní plochu hlasivek. Model mapuje změny koronálního tvaru hlasivek prostřednictvím vibračních cyklů. Vibrační charakteristiky včetně pohybů slizničních vln jsou potom vizualizovány pomocí syntetického kymogramu graficky získaného metodou lokálního osvětlení. Kinematický model lze vidět na následujícím obrázku 13.



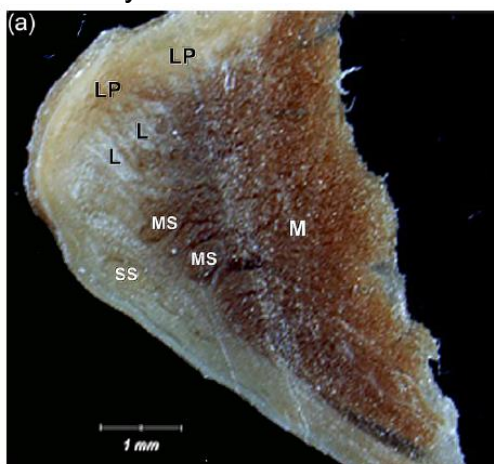
Obr.13 Kinematický model [35]

Kinematika modelu vybraná v časových instancích 8.7ms, 10.6ms, 12.1ms a 15.0ms pro znázornění a) otevření, b) maximální otevření, c) uzavření, d) úplné uzavírací fáze. Kymografický obraz e) byl získán zřetěžením jednobarevných obrázků ze všech po sobě jdoucích časových kroků.

Morfologie lidských hlasivek

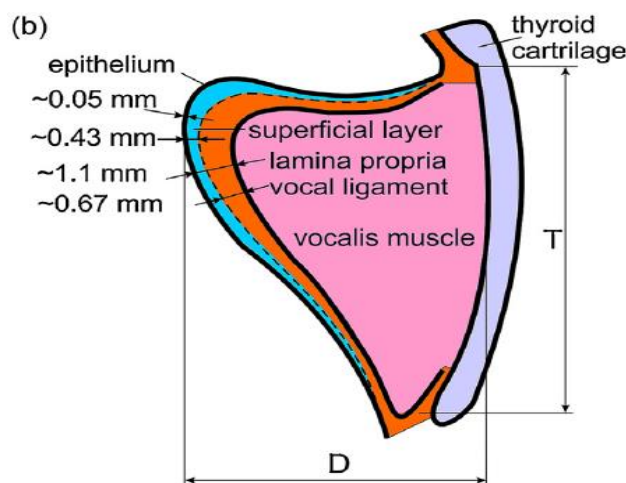
Prvotní zkoumání hlasivek představilo polo-tekutý prostor [23] Protkaný vlákny mezi povrchem záhybu a mezi svaly hlasivek. Tento prostor se nazývá povrchová lamina propria.

Za pomocí anatomické pitvy a histologického vyšetření [24,25] lze hlasivku rozdělit na několik rovin 1) svalový vokál 2) vokální vaz, který se skládá ze střední a hluboké vrstvy povrchové laminy proprii a za 3) vnější vrstva hlasitého vaz, která je známá jen jako povrchová lamina propria [26]. Na následujícím obr.14 lze vidět koronální průřez hlasivky.



Obr.14 a) Koronální průřez uprostřed hlasivky 61leté ženy [28]

Tato na tekutinu bohatá vrstva obsahuje jemné „pletivo“ vzájemně se zkřížených kolagenů a elastických vláken [27]. Samotné hlasivky jsou zakryty stratifikovaným epitelem. Prostor mezi vokálem, vazem a epitelem je klinicky identifikován jako takzvaný Reinkeův prostor. Sliznice Hlasivek se skládá z epitelu a povrchové laminy proprii. Základní látka povrchové laminy proprii obsahuje, respektive, je bohatá na kyselinu hyaluronovou. Koncentrace kyseliny hyaluronové v lidské povrchové lamině proprii na záhyb se pohybuje mezi 35 % a 60 % [27]. Hlavním faktorem závislosti rozmezí podílu kyseliny je věk a pohlaví zkoumané osoby. Na následujícím obrázku 15 lze vidět schéma vrstev tkáně hlasivek.

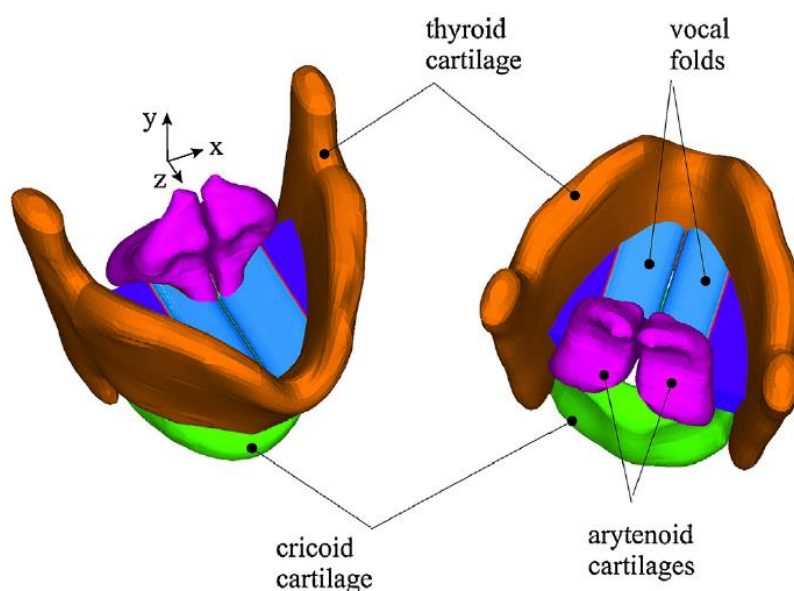


Obr.15 b) Schéma vrstev tkáně hlasivek [26]

Samobuzené vibrace s kolizemi 3D záhybů vokálu byly numericky simulovány pomocí předepsaného intra-glottálního tlaku daného periodickou funkcí proměnnou v čase. Vnitřní tlak, který zatěžoval povrch hlasivek, byl generován 2D aero-elastickým modelem hlasivek, které samovolně oscilují, detailně popsáno v práci [29]. Tlak na intra-glottalu byl zaznamenán během auto-oscilace hlasivek pro průchod vzduchu $Q=0,15$ l/s,

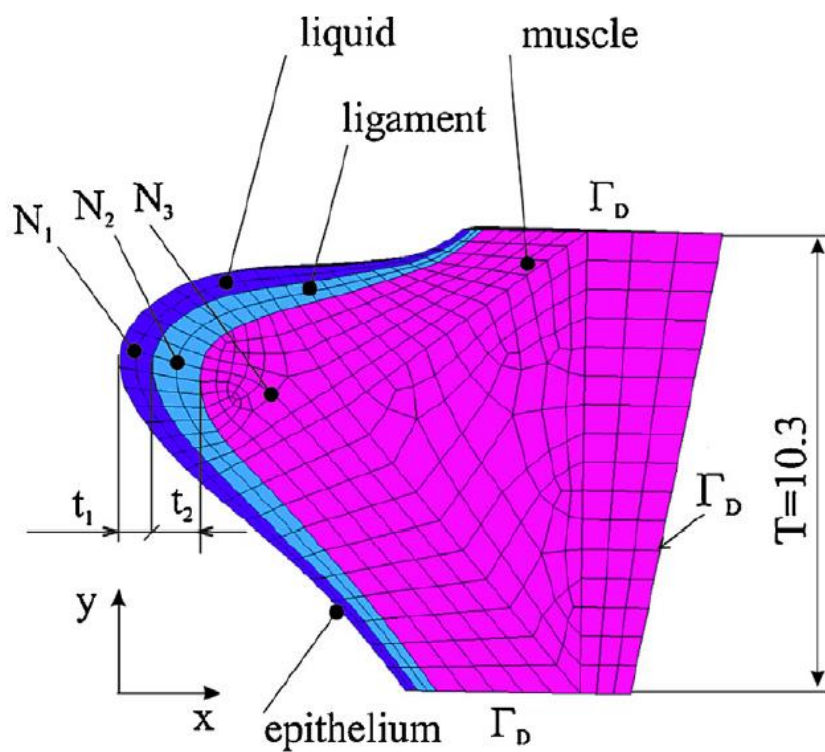
Výpočet dvou period glottálního tlaku byl popsán v práci [30]. Rázové napětí bylo odhadnuté pomocí Hertzovy teorie $IS=1,09$ kPa. Intra-glottální periodický tlak $p(y,t)$, byl simulován pomocí 2D aero-elastického modelu. Také se používá pro excitaci 3D FE modelu hlasových záhybů. Tlakové zatížení bylo aplikováno na všechny uzly na síti povrchu hlasivek v intra-glottální oblasti, tj. na povrchu hlasových záhybů z nižších a vyšších okrajů hlasivek, a také podél celé délky hlasivek ve směru z.

Na následujícím obrázku 16 je vidět 3D FE model lidského hrtanu, kde jsou hlasivky upevněny na chrupávkách arytenoidů a štítné žlázy. Falešné hlasivky, které nebyly ve studii [30] brány v úvahu, nejsou zobrazeny.



Obr.16 3D FE model [30]

Na dalším obrázku 17 je uveden M5 model hlasivek, používaný v této práci [30].



Obr.17 Model hlasivek uvedený v práci [30]

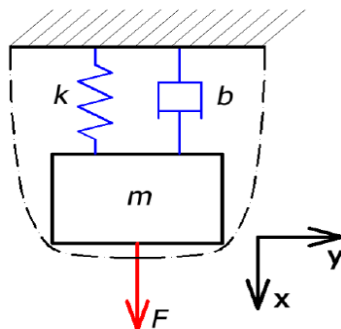
4 PŘEHLED VÝPOČTOVÝCH MODELŮ

4.1 Hmotové modely

Tyto modely sloužili k prvnímu fyzikálnímu a matematickému popisu pohybu lidských hlasivek, hlavním důvodem byla možnost analytického vyjádření pohybu. Jde o nejjednodušší používané modely a lze je klasifikovat jako jedno-, až n-hmotové.

4.1.1 Jedno-hmotový model

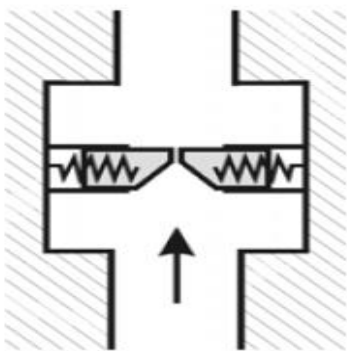
U jedno-hmotového modelu (viz obr.18) uvažujeme symetrii, s jejím uvážením postačí pro tento model pracovat pouze s jednou hmotou, která bude reprezentovat hlasivku. Představuje kmitání, a to s jedním stupněm volnosti. Lze s ním popsat pohyb pouze v jedné ose, například v ose „x“, také ovšem nelze s ním věrohodně postihnout pohyb hlasivky [6]. Právě z tohoto důvodu se zavádějí n-hmotové modely, kde konfigurace více odpovídají realitě.



Obr.18 Jedno-hmotový model [11]

4.1.2 Ewaldova píšťala

Ewaldovu píšťalu (viz obr.19) si můžeme představit jako trubici s protiráznými jazýčky uchycenými na pružných členech. Ewald ovšem nedokázal svůj model matematicky nebo jiným způsobem přesně popsat [5].

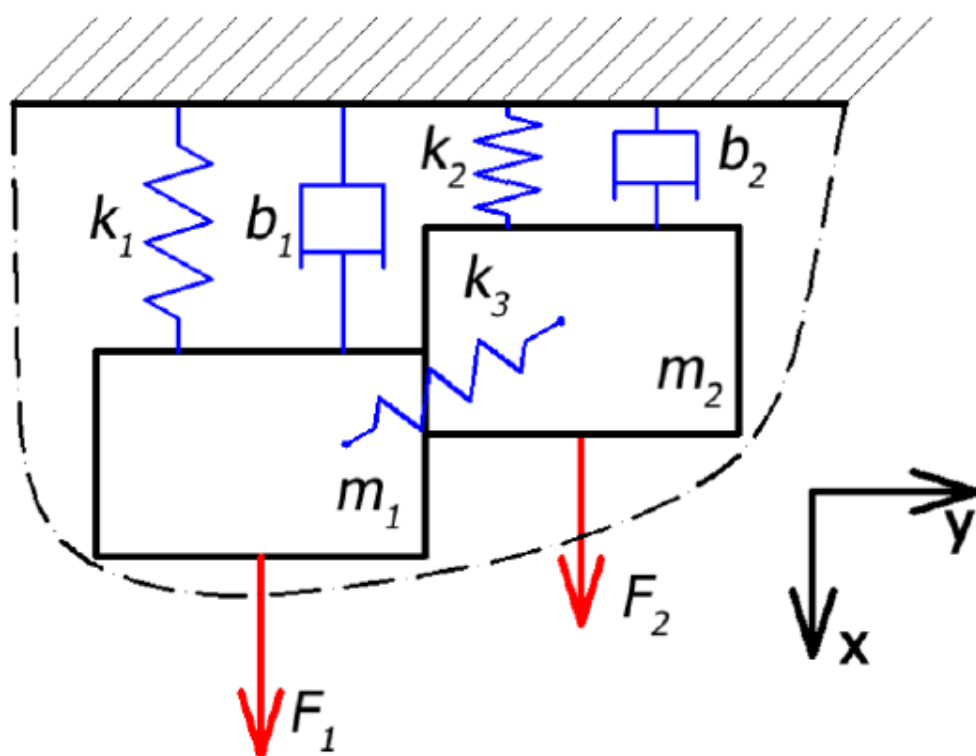


Obr.19 Ewaldova píšťala [5]

4.2 N-hmotové modely

4.2.1 Dvou-hmotový model

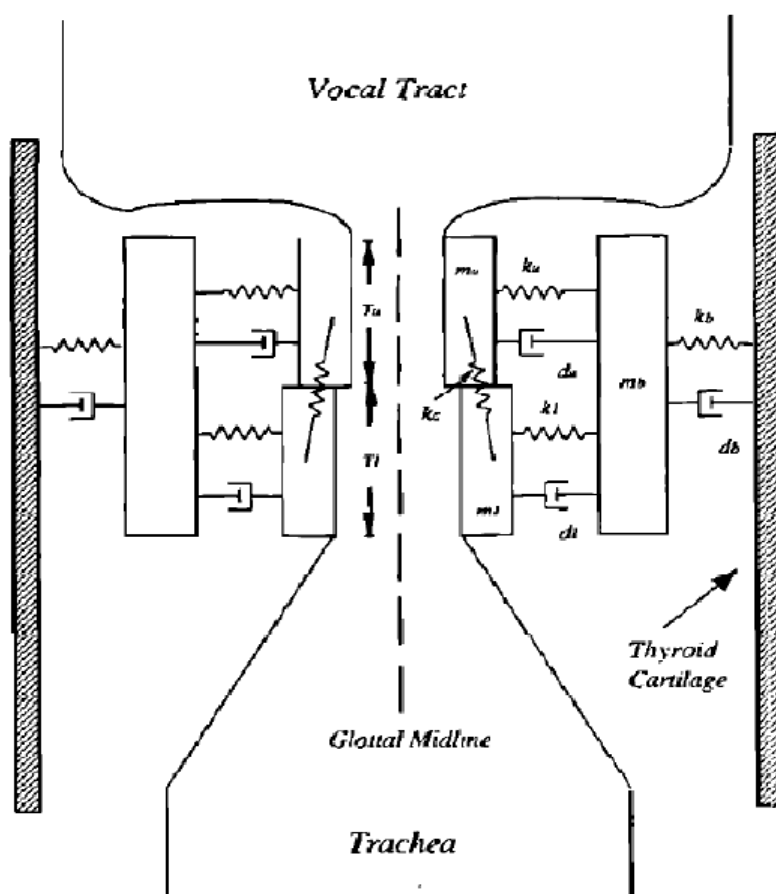
Často používaný a často diskutovaný model. Jde o kmitání se dvěma stupni volnosti. Při pohybu hmot, za normálních fonačních parametrů, dochází k fázovému předbíhání hmoty tělesa jedna vůči hmotě tělesa dvě, v důsledku toho obdržíme pohyb, který svou charakteristikou připomíná právě slizniční vlnu [5]. Tento model lze vidět vyobrazen na obrázku 20.



Obr.20 Dvou-hmotový model [11]

4.2.2 Troj-hmotový model

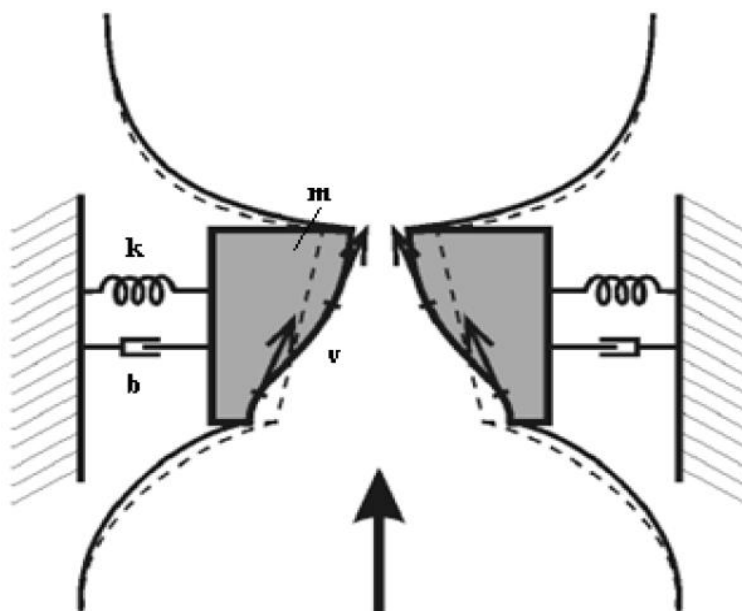
Jde o simulaci pohybu obalu a těla samotné hlasivky pomocí modelu, který vychází z dvou-hmotové konfigurace modelu. Obal je představován dvěma stejně silnými hmotami m_u , m_l . Třetí hmota představuje thyroaritenoidní sval, který je zde přidán za účelem simulace právě těla hlasivky. Členy k_u a k_l reprezentují tuhost obalu a tuhost mezi obalem a tělem hlasivky, jsou také známy jako členy pružné [7]. Poslední člen k_b reprezentuje tuhost tkáně těla hlasivky. Tento model lze vidět na obrázku 21.



Obr.21 Troj-hmotový model [8]

4.2.3 Model slizniční vlny

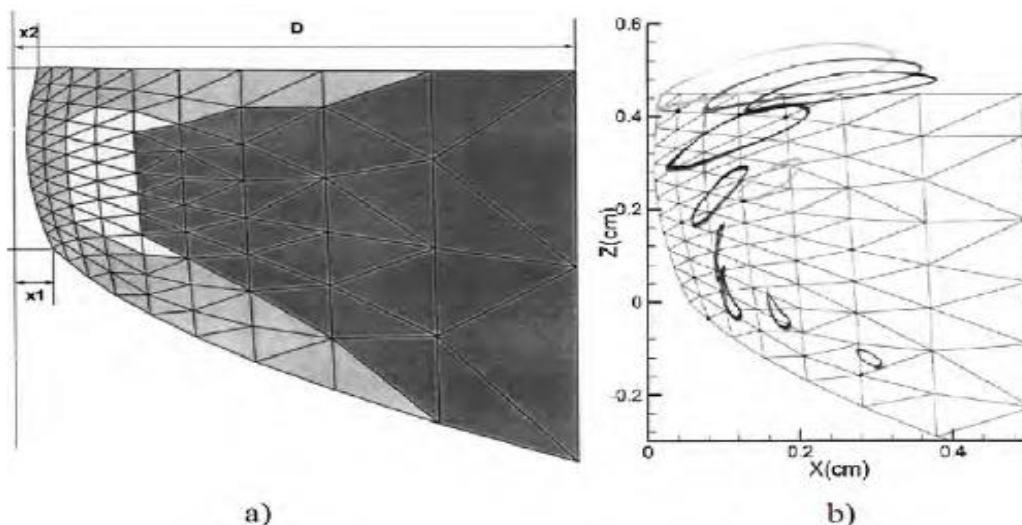
Slizniční vlna může být charakterizována jako vlnový pohyb obalu hlasivek. Reprezentuje přímý dopad morfologie ligamentu. Podle dřívějších informací vykazuje model velmi podobné chování jako dvou – hmotový model [1]. Model slizniční vlny lze vidět na obr.22.



Obr.22 Model slizniční vlny [1]

4.2.4 FEM model kmitajících hlasivek

Autoři článku [16] vytvořili troj-vrstvý model hlasivek (obr. 23). Model má nepravidelnou geometrii a popisuje ortotropní vlastnosti materiálu. Jedná se o symetrický model, kterým se dají simulovat různé druhy poruch hlasu. Pomocí bodů vytvořených v modelu byly získány trajektorie pohybu samotných hlasivek.



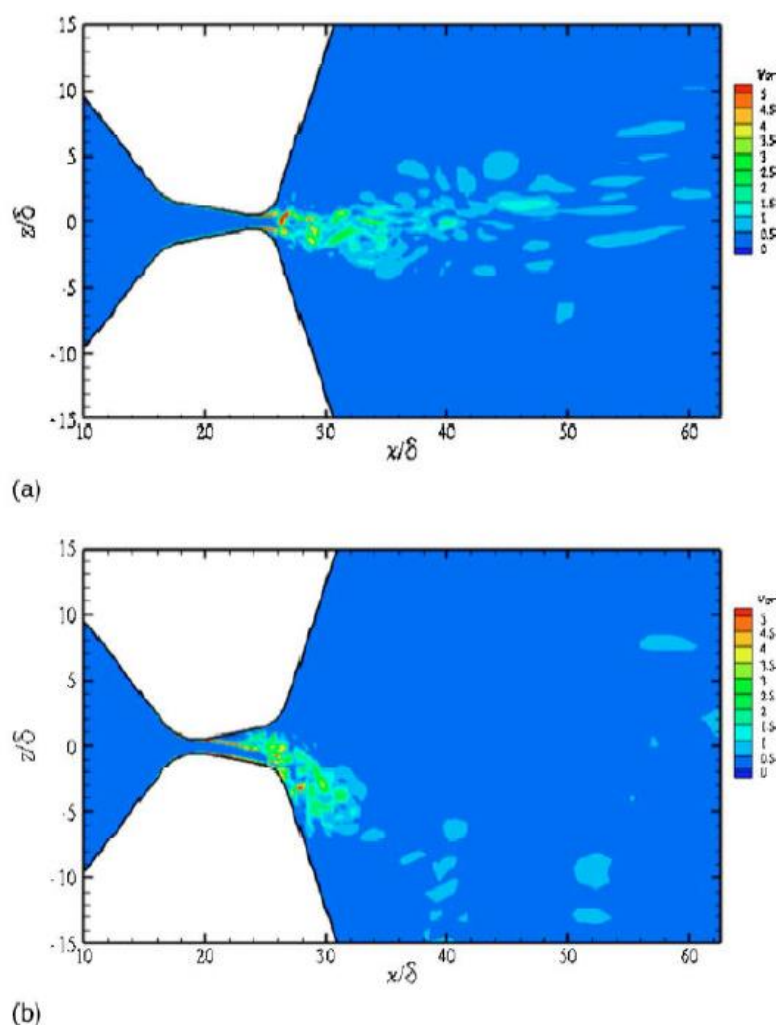
Obr.23 a) FEM model b) Trajektorie pohybu hlasivek [16]

5 MODELÝ PROUDĚNÍ

Nejčastěji se používají modely na principu Navier – Stokesových rovnic, často s předepsaným pohybem hlasívkového páru, případně se také hlasivky dají považovat za nepohyblivé s určitou mezerou. Za takových podmínek se zkoumá charakter proudění.

5.1 Tuhý model hlasivek – proudění

Jde o numerickou simulaci turbulentního přechodu proudu vzduchu přes tuhý model hlasívkové mezery [9]. Glottis je idealizován jako rovinný prvek, dal by se považovat za kanál se vstupním otvorem. Důležitým faktem použitého tvaru hlasivek je statická poloha v závislosti na čase. Z toho plyne, že jde o nepoddajný tuhý model, byl realizován ve dvou variantách, a to sice *konvergentní – sbíhající* (obr.24 a) a *divergentní – rozbíhající* (obr.24 b) [9]. Hlasivky svírají úhel 20° a minimální vzdálenost mezi nimi je 0,04 cm. Tlak přes glottis dosahuje hodnoty 15 cm vodního sloupce.

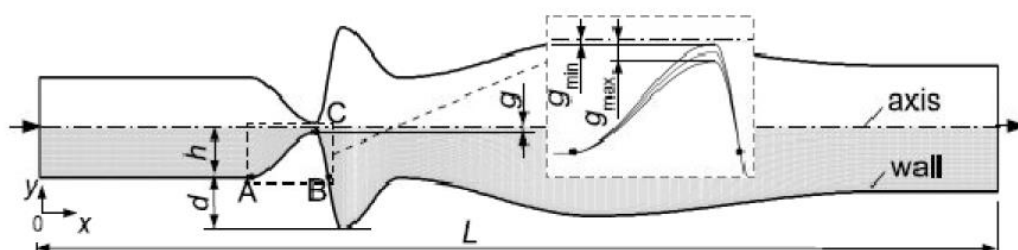


Obr.24 Průběh okamžité vířivosti [9]
a) konvergentní glottis b) divergentní glottis

Z obrázků můžeme vidět patrný rozdíl mezi oběma uvažovanými případy. V prvním případě vidíme hustý výskyt turbulentního průběhu v místě průduchu vzduchu nejužší oblastí glottisu. Pro divergentní variantu je vidět menší výskyt vířivých jevů, také dochází k dalšímu částečnému útlumu [9]. Proud vzduchu zde má mnohem větší šikmost. V bodu odtržení, který se nachází ve středu oblasti, dochází k odtržení toku stěny.

5.2 Model nestacionárního proudění vzduchu

Jde o proudění s předepsaným pohybem hlasivek. Zde u tohoto modelu je simulováno rovinné, neustálené, stlačitelné, viskózní pole vzduchu v symetrickém kanálu o nízké vstupní rychlosti [10]. Nestacionární tok je způsoben předepsaným pohybem části stěny kanálu, která se během oscilace rozkmitá s velkými amplitudami, při kterých dojde téměř k uzavření kanálu, což představuje pohyb hlasivek, celá síť je tvořena čtyřuzlovými prvky a posuvy mřížky vycházejí z harmonických pohybů při frekvenci stěn 100 Hz. Přitom je rychlost vzduchu z plic nastavena na Machovo číslo $M_c=0,012$. Když se mezera mezi hlasivkami bude zmenšovat, dojde k nárůstu rychlosti (Machova čísla), současně se stávají podstatné viskózní síly. Autoři [10] pro popis pohybu kontinua používají Arbitrary Euler – Lagrangeovu metodu, která zabraňuje velkým deformacím sítě. Na obr. 25 je zobrazena použitá geometrie výpočtového modelu.



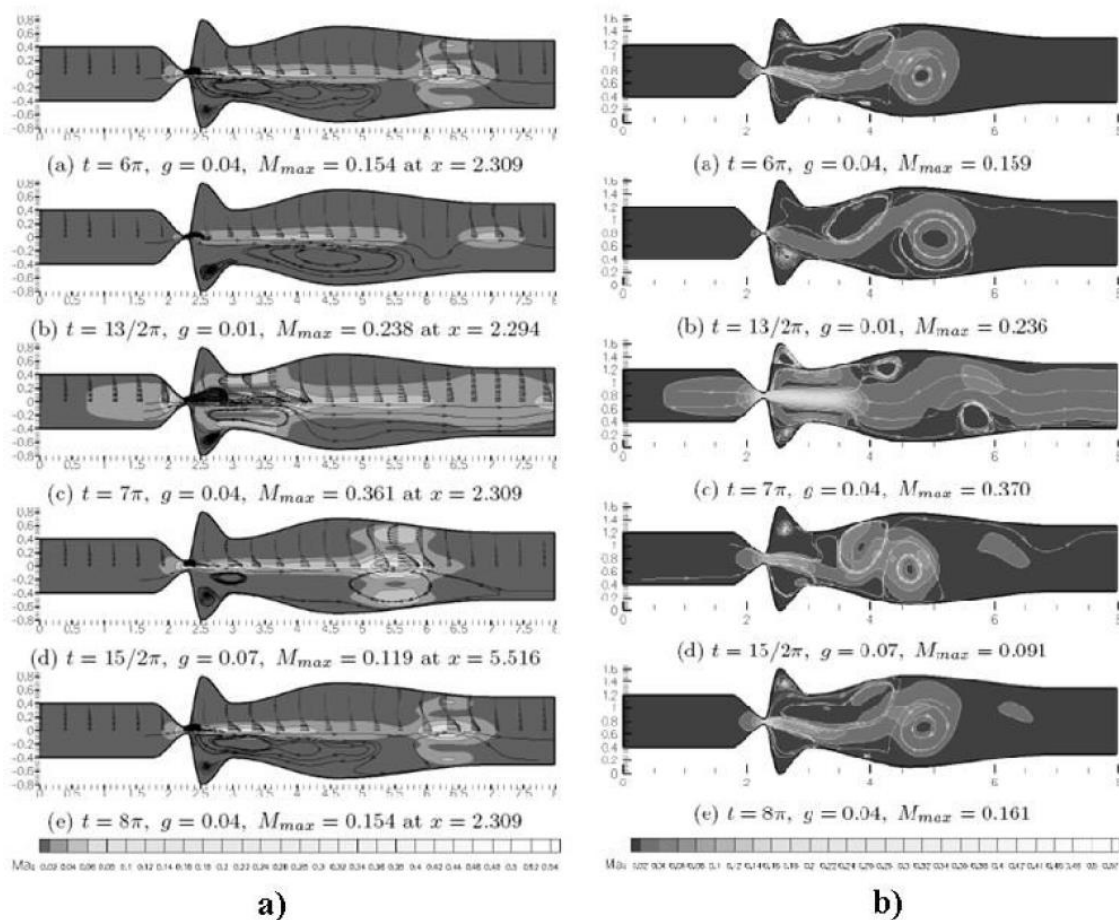
Obr.25 Geometrie výpočtového modelu[10]

Podstatou je výzkum citlivosti pole proudu vzduchu v supra-glottickém prostoru na předepsání symetrických podmínek a studium otázky polohy bodu odtržení. Model je postaven na základě rovinného konzervativního tvaru Navier-Stokesovy rovnice popisující nestálé laminární proudění stlačitelné viskózní tekutiny.

Na následujících obr.26 je zobrazeno srovnání vypočtených rychlostí proudění pro symetrické a nesymetrické okrajové podmínky, a také pro různé varianty šířky mezery mezi hlasivkami, Machova čísla M a času t .

Symetrické – V kanálu rozlišujeme dolní polovinu se zobrazením iso-čar Machova čísla a horní polovinu s vektory rychlosti proudu.

Nesymetrické – Výsledky zachycují iso-čáry machova čísla a proudnice (aerodynamický tvar proudu) [10].



Obr.26 Rozložení rychlostí [10]

a) Symetrické okrajové podmínky b) Nesymetrické okrajové podmínky

V případě numerického řešení je třeba rozdělit proces na dva základní kroky

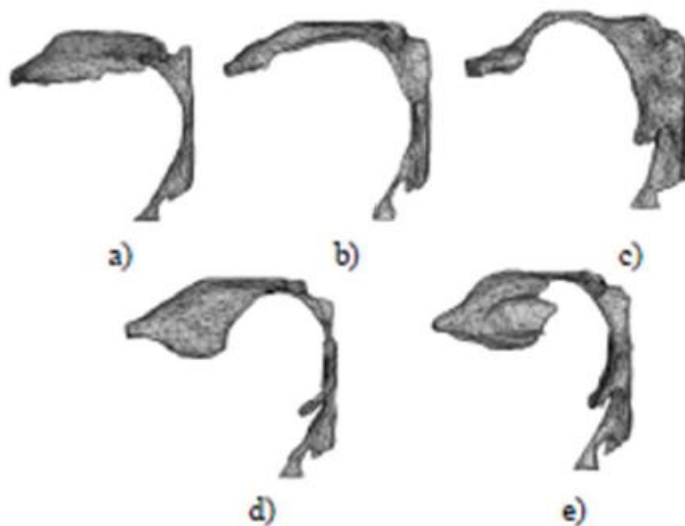
- I. Výpočet ustáleného proudění s pevnou polohou stěny ve středu mezery mezi body A B, ze kterého autoři obdrželi počáteční podmínky pro neustálé proudění.
- II. Vlastní výpočet neustáleného proudění

Realizace numerického řešení proběhla metodou konečných objemů a explicitním predictor – corrector McCormacovým algoritmem s použitím Jamesovy umělé viskozity. Autoři [10] použili a vyvinuli pro výpočty vlastní software.

6 3D VÝPOČTOVÉ MODELY

Využití 3D modelů se začalo používat a našlo uplatnění až na přelomu 20. a 21. století hlavně z důvodu příchodu výkonnější výpočetní techniky. Vychází ze zobrazovacích metod naprosto stejně jako 1D a 2D modely, jediným rozdílem je, že v tomto případě se model žádným způsobem nezjednodušuje. K samotnému výpočtu slouží metoda konečných prvků (MKP)

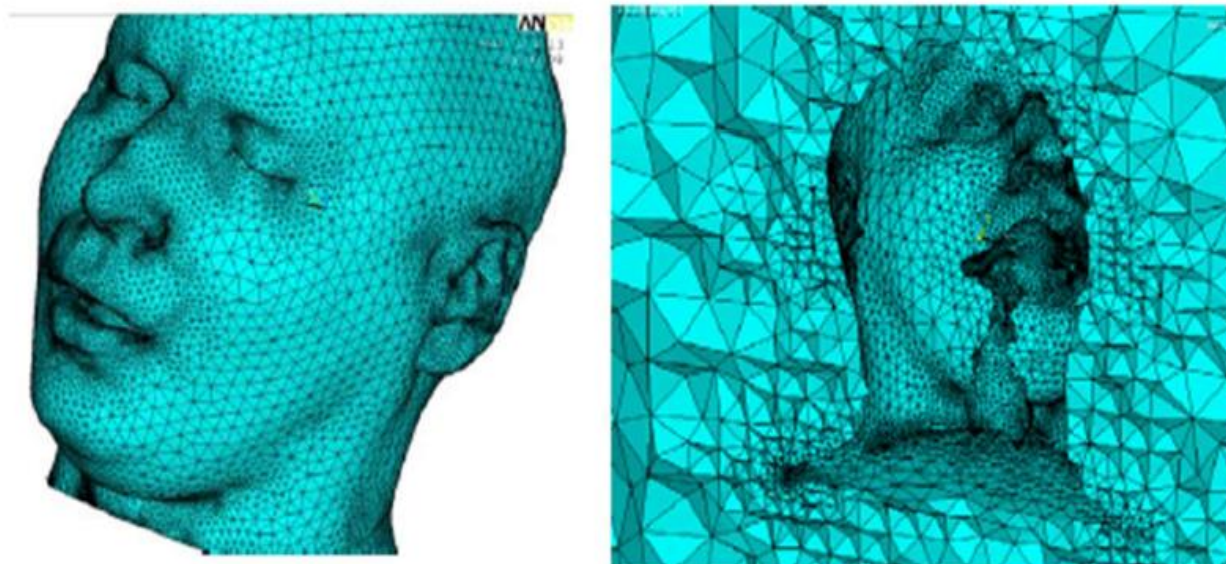
Autoři Švancara a Horáček se ve své práci [12] zabývají na změnu produkce lidského hlasu vlivem odebrání krčních mandlí. Provedli modální analýzu pro samohlásky českého jazyka pro model s mandlemi a poté pro model bez mandlí, následně provedli porovnání hodnot. Ke 3D modelu využili metodu konečných prvků (MKP). Na obr.27 můžeme vidět tvary traktu pro jednotlivé samohlásky.



Obr.27 Tvary vokálního traktu pro jednotlivé samohlásky [12]

- a) Tvar vokálního traktu pro samohlásku „a“
- b) Tvar vokálního traktu pro samohlásku „e“
- c) Tvar vokálního traktu pro samohlásku „i“
- d) Tvar vokálního traktu pro samohlásku „o“
- e) Tvar vokálního traktu pro samohlásku „u“

Autoři: Švancara, Tomeček, Horáček a Švec ve své práci [13] popisují tvorbu modelu vokálního traktu hlavy takovým způsobem, aby bylo možné simulovat šíření zvuku ve vokálním traktu, ale hlavně i v prostoru hlavy. Model podrobuje buzení LF modelem hlasivkového signálu (viz obr.28).

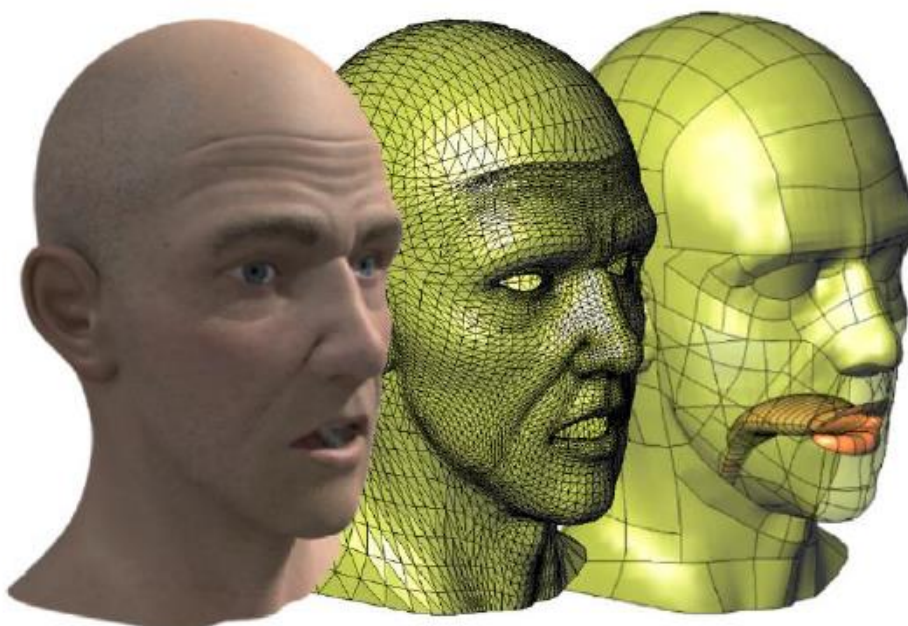


Obr.28 MKP model vokálního traktu a prostoru okolo hlavy [14]

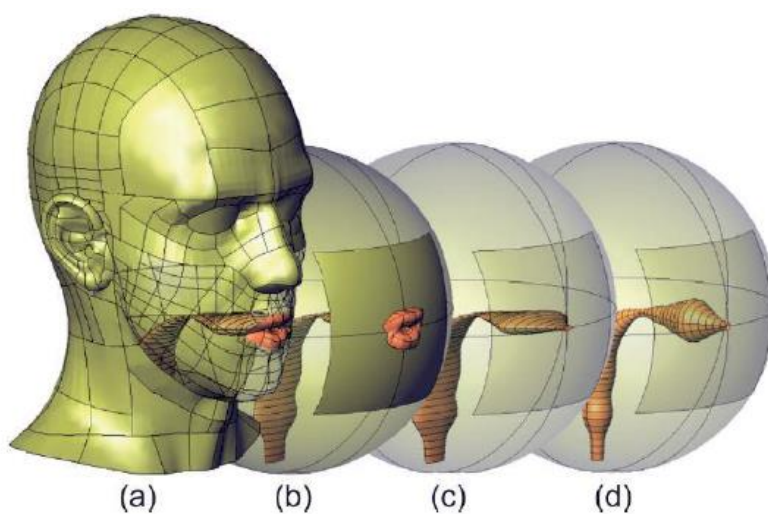
6.1 PML 3D model vokálního traktu a prostoru hlavy

Využívá se zde PML vrstvy (Perfectly Matched Layer), významem této vrstvy je absorbovat všechny dopadající akustické a tlakové vlny. Výhodou PML vrstvy je možnost její aplikace prakticky na každý obecný tvar tvořící konečnými prvky. Naproti tomu obecný tvar objektu tvořící konečnými prvky je úspornější z hlediska počtu elementů tvořící tento objekt [14]. Přes výhodu PML vrstvy je zde i velká nevýhoda, a to komplikovanost její aplikovatelnosti. Výpočtové modely s takovou vrstvou často nekonvergují.

V publikaci se zkoumá vliv geometrie hlavy a rtů na šíření akustických vln simulující tvorbu samohlásek v časové oblasti metodou konečných prvků (MKP). Na následujícím obr.29 je vidět geometrie lidské hlavy při fonaci. A na následujícím obr.30 zjednodušenou geometrii vokálního traktu a hlavy.



Obr.29 Geometrie lidské hlavy při fonaci [14]



Obr.30 Zjednodušená geometrie vokálního traktu a hlavy [14]

- a) Realistická hlava
- b) Kulovitá hlava s reálnými rty
- c) Kulovitá hlava s eliptickým otvorem úst
- d) Kulovitá hlava s kruhovým otvorem

7 RYCHLOST ŠÍŘENÍ VLN V PEVNÝCH LÁTKÁCH

7.1 Podélné vlny

Určení rychlosti šíření akustického vlnění v pevných látkách je pro obecnou úlohu relativně složité. Z toho důvodu byl nejprve odvozen vztah (1.1) [41], který platí pro šíření podélných vln v tenkých tyčích.

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.1)$$

Při sledování šíření akustických vln v deskách musí být zahrnut vliv kontrakce ve formě poissonova poměru.

$$\mu = \frac{E-2G}{2G} \quad (1.2)$$

Kde G [N/m²] je modul pružnosti ve smyku.

Pro rychlost šíření podélných vln potom dostáváme vzorec upravený na tvar.

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{1-\mu^2}} \quad (1.3)$$

U běžných materiálů, u nichž je poissonův poměr malý, se prakticky neliší rychlost šíření podélných vln v tyči a v desce. U pryže, pro poissonův poměr 0,49, což je i náš případ, je rozdíl dle vzorců (1.1) a (1.2) asi 15 %. To proto, že materiál je prakticky nestlačitelný.

V následující tabulce 1 budou uvedeny rychlosti podélných vln v různých látkách.

Tabulka 1 – rychlost šíření podélných vln v různých látkách [41]

Materiál	P [kg/m ³]	E [N/m ²]	C _L [m/s]
Vzduch 20 °C	1.21	-	344
Voda 13 °C	1000	-	1440
Pryž měkká	900	4.4e4	70
Pryž tvrdá	1100	2.2e9	1400
Korek	250	6.3e7	500
Bukové dřevo	650	1.0e10	3900
Hliník	2700	6.2e10	4800
Ocel	7850	2.6e11	5750
Olovo	11400	2.3e10	1410
Póroberon	900	2.9e9	1800
Azbestocement	1950	1.8e10	3040
Beton	2300	2.2e10	3100

7.2 Příčné vlny v pevných látkách

Rychlost šíření příčných vln [41] v tenkých tyčích C_T je možno počítat ze vztahu:

$$C_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.4)$$

Pokud dosadíme do rovnice (1.2) dostaneme výraz, který ukazuje, že poměr mezi rychlostí podélných vln a příčných vln je konstantní [41]. Je ale nutné upozornit, že rychlost podélných vln i příčných vln v tyčích a deskách je nezávislá na kmitočtu.

$$C_T = \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot 2(1+\mu)}} \quad (1.5)$$

7.3 Ohybové vlny

V tělesech, v nichž převládá jeden nebo dva rozměry vůči ostatním, jako jsou například desky nebo tyče, velmi snadno vzniká složením vlnění podélného a příčného vlnění ohybového [41]. Na rozdíl od vlnění podélného a příčného je rychlost ohybových vln závislá na frekvenci. Následně bude uveden výraz pro výpočet šíření ohybových vln ve tvaru:

$$C_B = \sqrt{2\pi f^4 \frac{EI}{m'}} \quad (1.6)$$

I [m⁴] – moment setrvačnosti průřezu dané tyče

m' [kg/m] – hmotnost jednotkové délky tyče

Dá se zjednodušit na následující tvar:

$$C_B = \sqrt{1.8 C_L h f} \quad (1.7)$$

h [m] – výška obdélníkového průřezu tyče

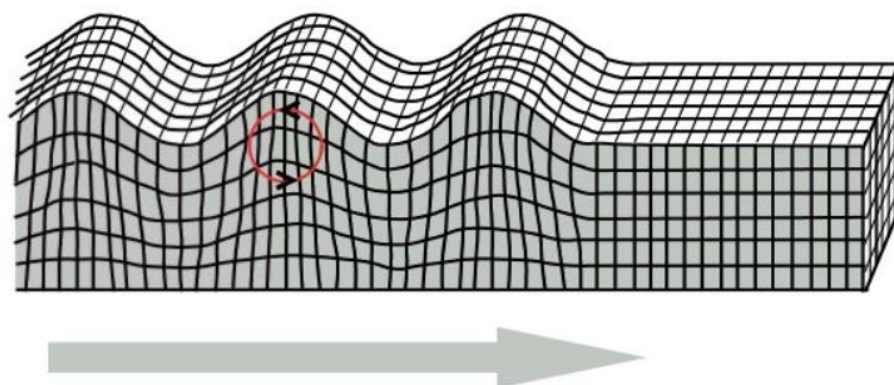
f [Hz] – frekvence

7.4 Rayleighovy povrchové vlny

Rayleighovy vlny jsou typem povrchové akustické vlny, které se pohybují po povrchu pevných látek. Mohou být vyvolány mnoha způsoby, například lokalizovaným nárazem a často se používají v nedestruktivním testování pro detekci defektů. Jsou také součástí seismických vln, které jsou na zemi vytvářeny zemětřesením.

Rayleighovy vlny jsou typem povrchových vln, které se pohybují blízko povrchu pevných látek [42]. Zahrnují jak podélné, tak příčné pohyby, které se s rostoucí vzdáleností od povrchu exponenciálně snižují. V izotropních pevných látkách tyto vlny způsobují, že se povrchové částice pohybují po elipsách v rovinách kolmých na povrch a rovnoběžných se směrem šíření. Pohyb částice je proti směru hodinových ručiček, když se vlna pohybuje zleva doprava (obr. 31).

Rayleigh Wave



Obr.31 Rayleighovy vlny [42]

Rychlost Rayleighovy vlny lze aproximovat dle vztahu:

$$C_R = C_T \frac{0.862 + 1.14\mu}{1 + \mu} \quad (1.8)$$

V následující Tabulce 2 jsou uvedeny rychlosti šíření podélných vln dle vztahu (1.3), rychlost šíření příčných vln dle vztahu (1.5), a rychlost šíření Rayleighových vln dle vztahu (1.8) pro materiál povrchové laminy proprii. Byly použity stejné materiálové charakteristiky jako v následujícím modelu řešeném metodou konečných prvků: $\rho=1040 \text{ kg/m}^3$, $\mu=0.49$, modul pružnosti v tahu byl měněn v rozsahu 100–1600 Pa. Rychlosti šíření ohybových vln dle vztahu (1.7) jsou uvedeny v Tabulce 3. (jednotka m/s) Pro tyč obdélníkového průřezu o výšce 0,9 mm (tloušťka povrchové laminy proprii). V článku [32] autoři uvádí, že frekvence slizniční vlny je pro muže 80-310 Hz a pro ženy 180-480 Hz. Proto byl volen rozsah frekvencí v rozsahu 80-600 Hz.

Tabulka 2 – rychlost šíření podélných, příčných a Rayleighových vln

Modul pružnosti v tahu PLP [Pa]	C_L [m/s]	C_T [m/s]	C_R [m/s]
100	0.356	0.180	0.171
200	0.503	0.254	0.242
400	0.711	0.359	0.343
800	1.006	0.508	0.484
1600	1.423	0.719	0.685

Tabulka 3 – rychlost šíření ohybových vln

Modul pružnosti v tahu [Pa] // frekvence [Hz]	80	210	340	470	600
100	0.215	0.348	0.443	0.52	0.588
200	0.255	0.414	0.526	0.619	0.699
400	0.304	0.492	0.626	0.736	0.832
800	0.361	0.585	0.744	0.875	0.989
1600	0.429	0.696	0.885	1.041	1.176

Dle výsledků z tabulek 1 a 2 můžeme vidět, že naměřených hodnotám rychlosti slizniční vlny u hlasivek [32], kde je uvedena rychlost 2.1–10 m/s se nejvíce blíží rychlost podélných vln a rychlost ohybových vln pro největší modul pružnosti v tahu a nejvyšší frekvence. Je nutné zdůraznit, že výše uvedené vztahy pro výpočty rychlostí nemohou dostatečně vystihnout skutečnou rychlost šíření slizniční vlny na hlasivce. Protože hlasivka má vrstevnatou strukturu a její geometrie neodpovídá ani tyči, ani desce.

8 MODÁLNÍ ANALÝZA

Modální analýza modelu hlasivek u vokálního traktu je první krok výpočtového modelování. Touto analýzou lze pomocí změny materiálových parametrů ladit vlastní frekvence hlasivek tak, aby odpovídali frekvenci kmitů na skutečných hlasivkách.

Zobecněný problém vlastních hodnot, pomocí kterého lze modální analýzu provádět v softwaru ANSYS, je pro volné netlumené kmitání definován v literatuře [18] a [19], Fyzikální interpretace modelu v metodě konečných prvků je soustava hmot, pružin a tlumičů. Metoda konečných prvků řeší kmitání kontinua, které je následně nahrazeno na konečné elementy tak, že nakonec dostáváme formálně stejné pohybové rovnice jako pro soustavu se soustřednými parametry.

Volné kmitání

Volné kmitání soustavy vzniká, pokud je soustava po vychýlení z rovnovážné polohy uvolněná a ponechává v pohybu bez účinků buzení pomocí vnějších sil.

Volné netlumené kmitání

Je volné kmitání soustavy bez účinků tlumení, tudíž nedochází k disipaci energie.

V případě naší práce nebude uvažováno tlumení, tíhová síla, ani budící síla „F“. Za tohoto předpokladu dostáváme pohybovou rovnici kontinua diskretizovaného metodou konečných prvků ve tvaru:

$$M\ddot{u} + Ku = 0 \quad (2.0)$$

- M – matice hmotnosti
- K – matice tuhosti
- \ddot{u} – uzlový vektor zrychlení
- u – uzlový vektor posuvu

Předpokládáme řešení v harmonickém tvaru:

$$u = \Phi_i \cdot \cos \omega_i t \quad (2.1)$$

- Φ_i – vlastní vektor
- ω_i – vlastní úhlová frekvence
- t – čas

To po dosazení do vztahu (2.0) vede na rovnici:

$$(-\omega_i^2 M + K) \cdot \Phi_i = 0 \quad (2.2)$$

Tato rovnice je splněna, pokud je vlastní vektor nulový, nebo když je determinant z celé závorky nulový. Pro netriviální řešení musí platit:

$$|K - \omega^2 M| = 0 \quad (2.3)$$

Což je takzvaný frekvenční determinant. Vlastní čísla a vlastní vektory se dají získat pomocí numerických metod, jako je například Block Lanczos (defaultní metoda v programovém systému ANSYS) metoda, PCG Lanczos metoda, QR Damper metoda a další. Podrobněji v literatuře [19].

Jako výstup řešení může být vlastní úhlová frekvence nebo pro nás názornější vlastní frekvence, která se dá získat přepočtem z vlastní úhlové frekvence:

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (2.4)$$

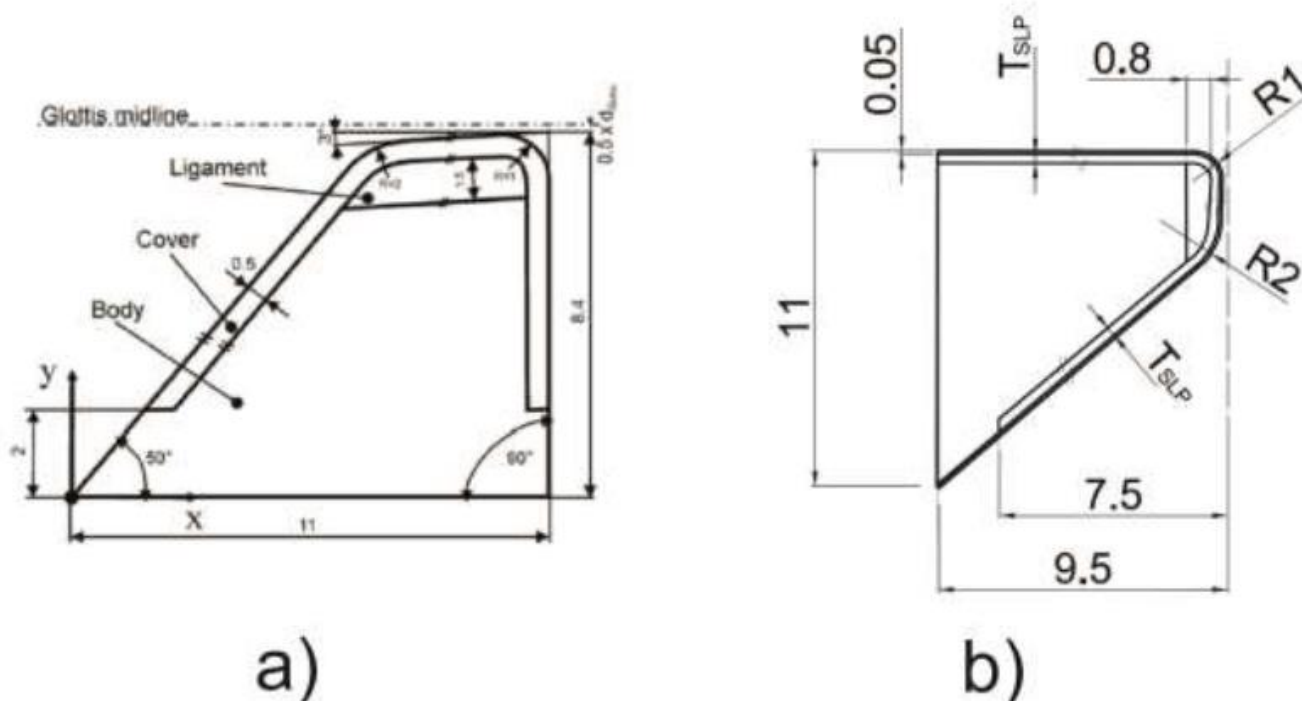
8.1 Model geometrie hlasivek

Jak již bylo zmíněno, bude vycházeno z Sherrerovi M5 geometrie, která je velmi často používána jako zjednodušený model skutečného modelu hlasivek.

Je třeba vytvořit geometrii vnitřní struktury hlasivek pro základní geometrický model. K řešení daného problému je potřeba znát tloušťky jednotlivých vrstev tkáně hlasivek. Pro vytvoření našeho modelu budou použity hodnoty z literatury [16]. V této literatuře je vytvořen třívrstvý model hlasivek. Proto byly použity některé geometrické rozměry a na základě jejich znalosti byl vytvořen podobný model, který se skládá z čtyř vrstev:

- Epitel
- Povrchová lamina propria
- Ligament
- Sval

Pro náš model byla upravena povrchová lamina propria až po vetknutí na horní hraně hlasivky, a zvětšená byla vzdálenost od vetknutí na spodní straně hlasivky. Model geometrie umožňuje měnit parametricky tloušťku povrchové laminy proprii. Pro účely této práce byla volena tloušťka 0.9 mm, která dávala při výpočtech kmitání hlasivek v interakci s proudícím vzduchem [2] dobré výsledky. Rovněž byl upraven ligament, a to tak, že pro náš model nebude uvažováno zkosení (viz obr.32).



Obr.32 Geometrie hlasivek a) M5 Shererova [16] b) Upravená pro modelování

8.2 Model materiálu vrstev hlasivek

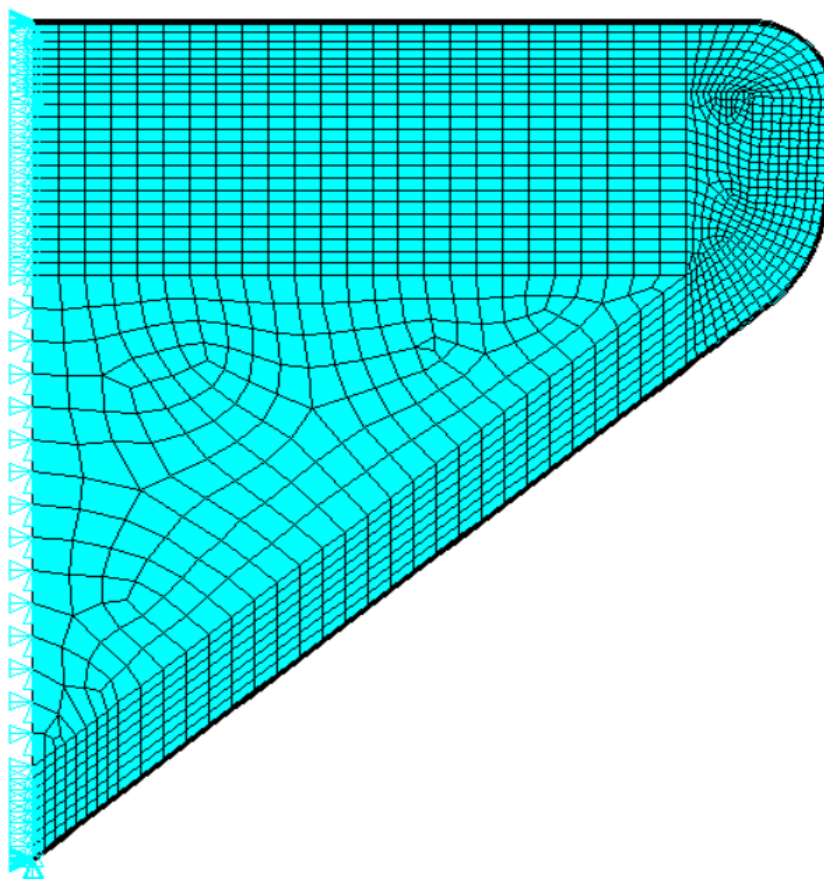
Byl použit a uvažován homogenní izotropní model materiálu pro všechny vrstvy. Materiálové parametry byly voleny na základě hodnot použitých při výpočtech kmitání hlasivek v interakci s proudícím vzduchem [43], kromě modulu pružnosti v tahu povrchové laminy proprii, který byl volen pro lepší šíření slizniční vlny v rozsahu 100–1600 Pa.

Tabulka 4 – materiálové charakteristiky

Vrstva	Modul pružnosti v tahu [Pa]	Poissonovo číslo [-]	Hustota [Kg/m ³]
Povrchová lamina proprii	100-1600	0,49	1040
Ligament	8000	0,49	1040
Sval	65000	0,4	1040
Epitel	25000	0,49	1040

Okrajové podmínky

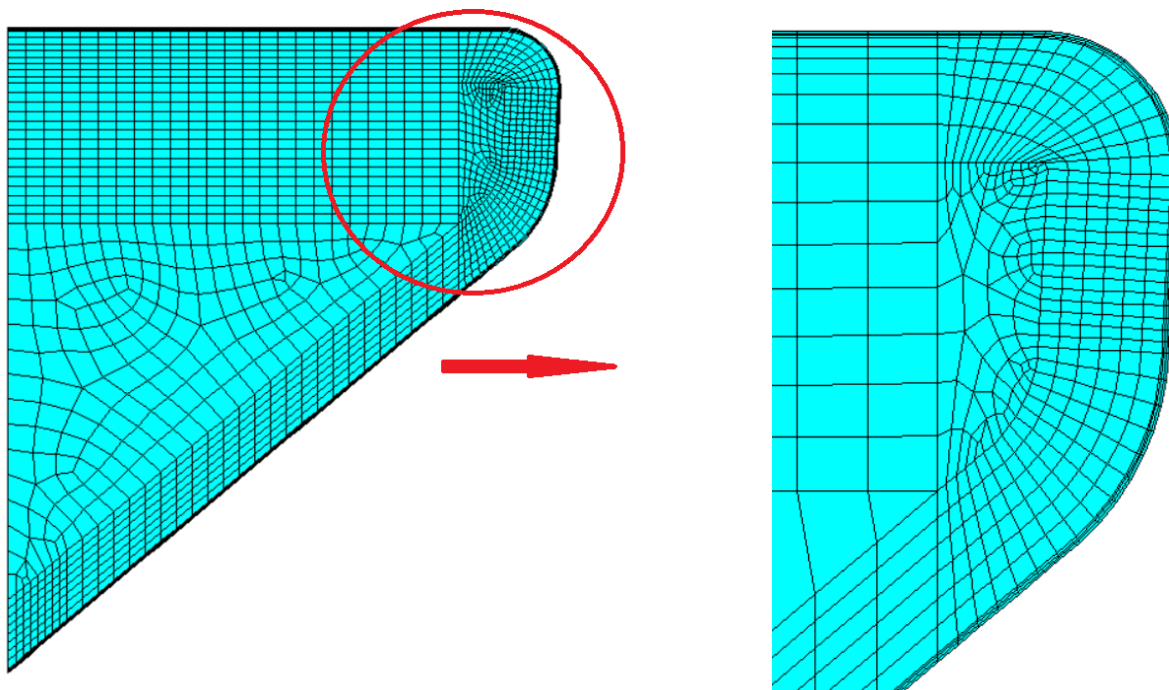
Pro náš případ bude uvažované vetknutí (v programu ANSYS zobrazeno modrými trojúhelníky) na laterální straně hlasivky (viz obr.33).



Obr. 33 Okrajová podmínka-vetknutí na laterální straně hlasivky

8.3 Vytvoření sítě tkáně hlasivek

Pro síť konečných prvků (MKP) vytvářenou v programu ANSYS byl použit strukturní lineární prvek PLANE182. Hustota sítě je volena tak, aby model umožnil zachytit pohyb hlasivek a slizniční vlny tak, aby bylo možné dostatečně přesně popsat chování slizniční vlny. Prvky ve vrstvách epitelu jsou rozloženy rovnoměrně, a to proto, aby se zamezilo zhroucení sítě kvůli větším posuvům, které konají jednotlivé uzly v průběhu výpočtu.



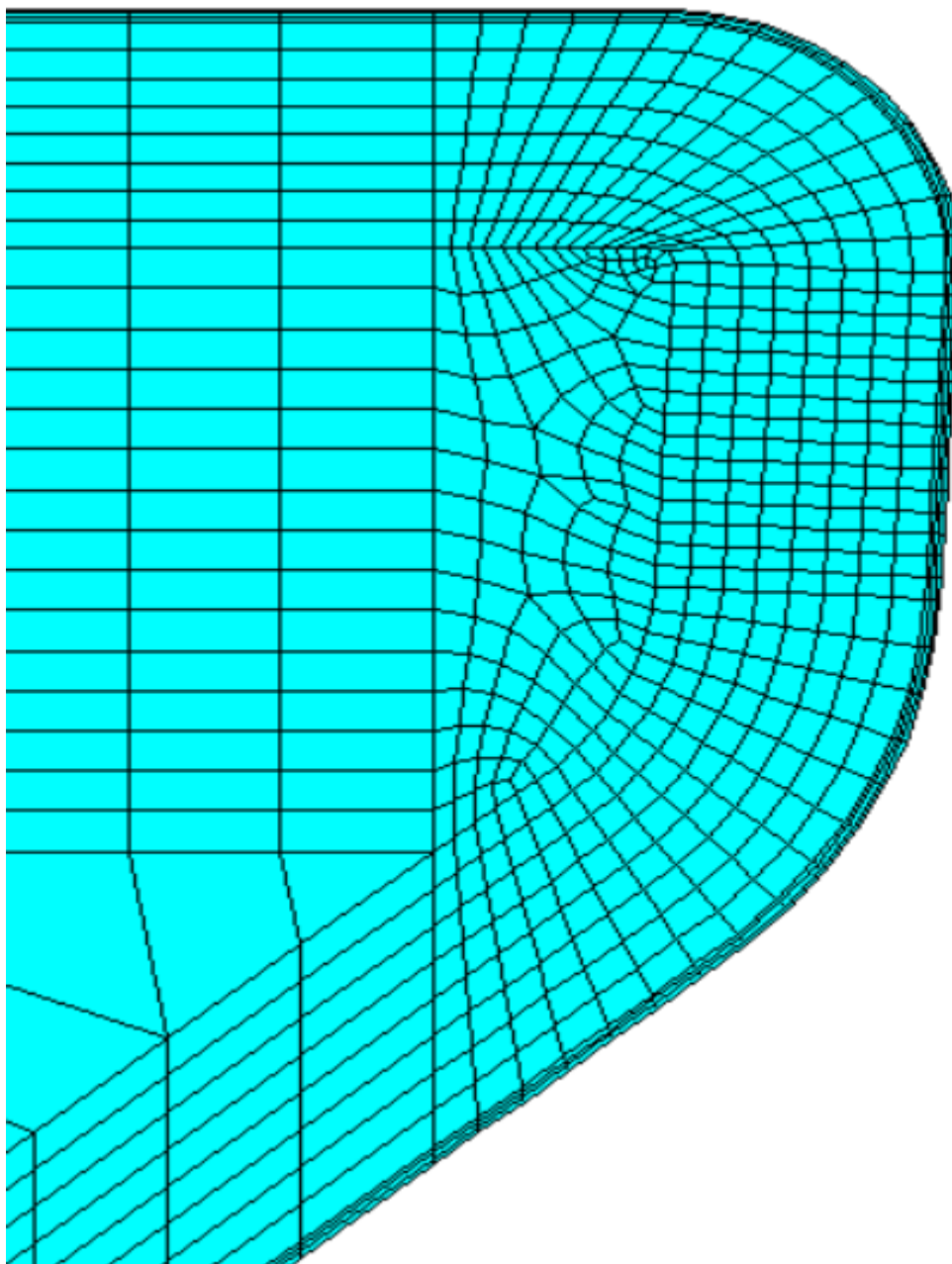
Obr.34 Síť konečných prvků na hlasivce, vlevo celková, vpravo detail – pro počet prvků 1314

Jako základní varianta byl volen počet prvků 2005 (použita v předchozích pracích [40]). Následně byl analyzován vliv velikosti prvků sítě na první tři vlastní frekvence. Na obr.34 je zobrazen příklad sítě konečných prvků pro počet prvků 1314. Výsledky výpočtů pro čtyři různé varianty velikosti prvků jsou uvedeny v tabulce 5. Rozdíly byly počítány vzhledem k základní variantě.

Tabulka 5 – Vliv velikosti prvku sítě

Varianta	1	2	3	4			
Počet prvků [-]	4027	2005	1844	1314	Rozdíl 2-1[%]	Rozdíl 3-1[%]	Rozdíl 4-1[%]
f1 [Hz]	107,48	107,52	107,86	107,75	0,037	0,356	0,251
f2 [Hz]	214,93	215,04	215,59	215,73	0,051	0,307	0,372
f3 [Hz]	239,70	239,76	240,02	240,64	0,025	0,134	0,392

Na základě testů hustoty sítě byla vybrána nejjemnější síť s počtem prvků 4027 (viz obr.35), která by měla nejlépe popsat šíření slizniční vlny a vykazuje malé odchylky v procentuálním rozdílu mezi frekvencemi.



Obr.35 Síť konečných prvků na detailu hlasivky pro 4027 prvků

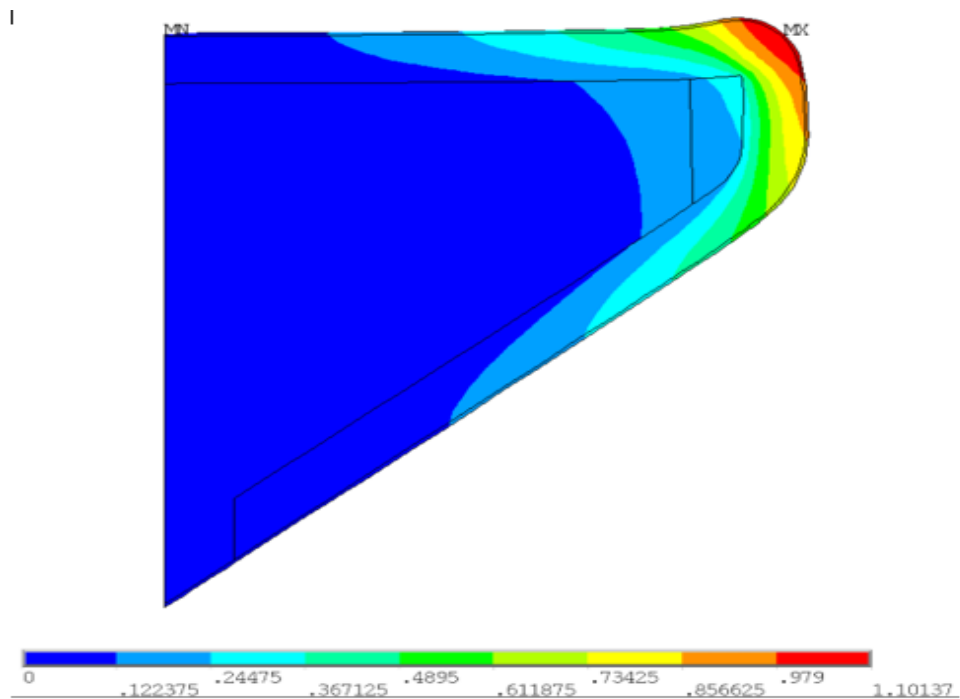
Výsledky modální analýzy

Nejdříve jsou uvedeny výsledky pro variantu s modulem pružnosti v tahu povrchové laminy $E_{PLP} = 100 \text{ Pa}$ (viz tabulka 4), která vykazovala v následujících výpočtech šíření slizniční vlny nejlepší výsledky. Bylo počítáno prvních třicet vlastních frekvencí a prvních patnáct je uvedeno v tabulce číslo 6.

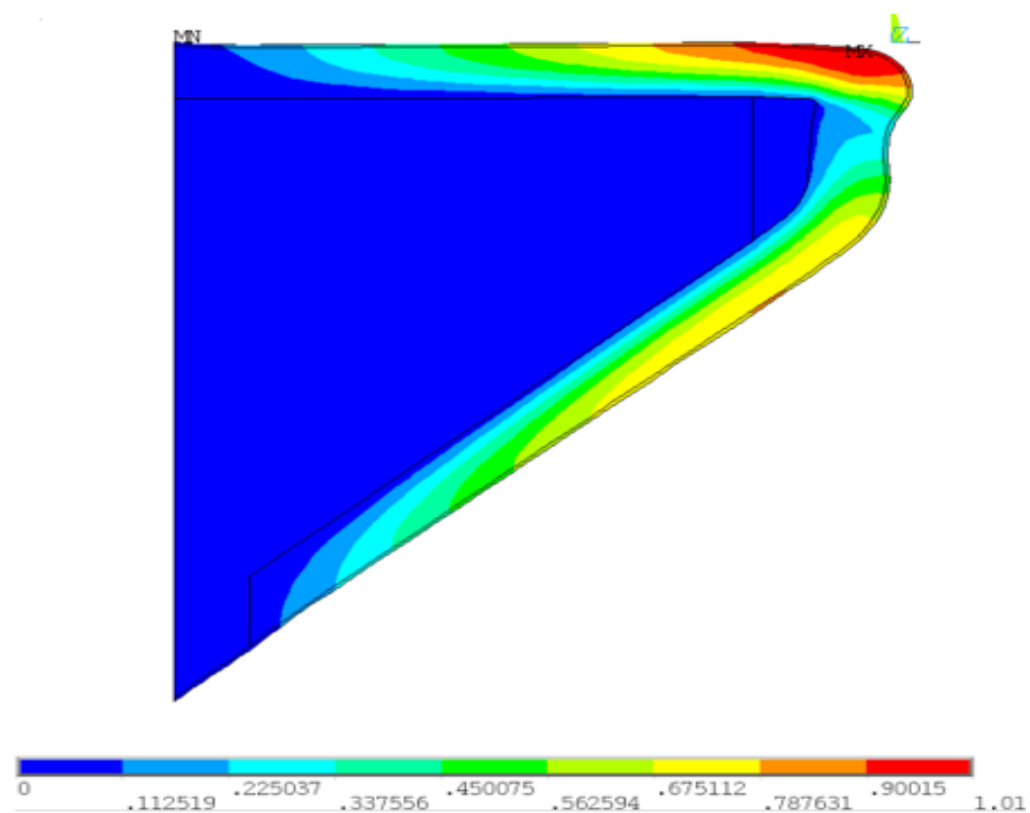
Tabulka 6 – prvních patnáct vlastních frekvencí pro $E_{PLP} = 100 \text{ Pa}$

Mód	Vlastní frekvence [Hz]
1	64,248
2	95,864
3	106,78
4	119,69
5	120,98
6	130,73
7	143,22
8	150,55
9	159,79
10	166,21
11	173,08
12	177,97
13	182,36
14	186,42
15	190,16

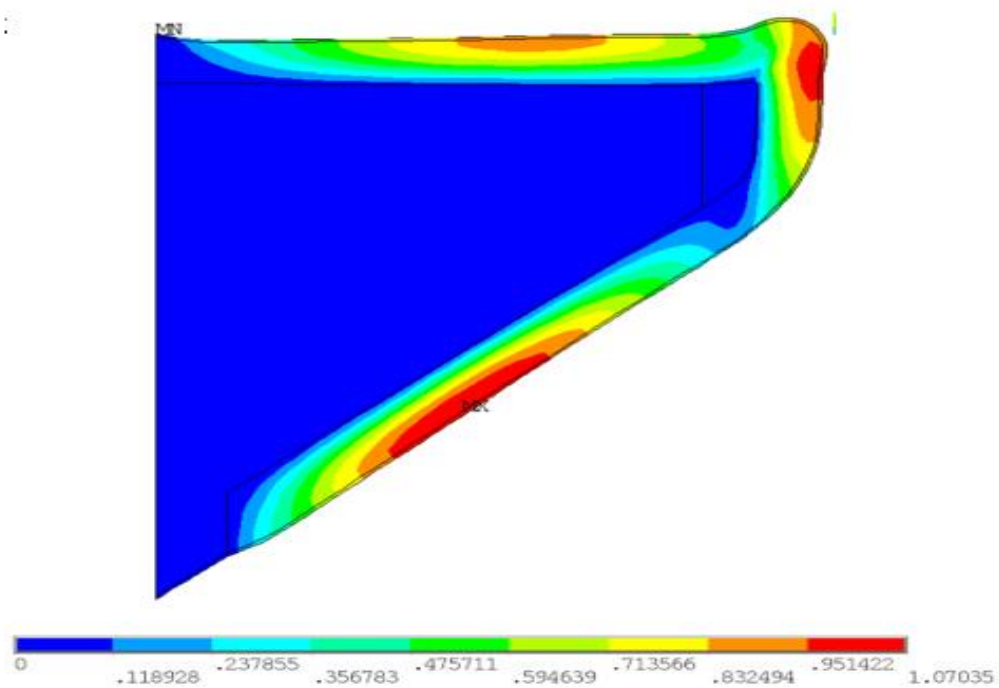
Na následujících obrázcích 36 až 40 je zobrazeno prvních pět tvarů kmitů. Barevnými mapami je zobrazena amplituda posuvů



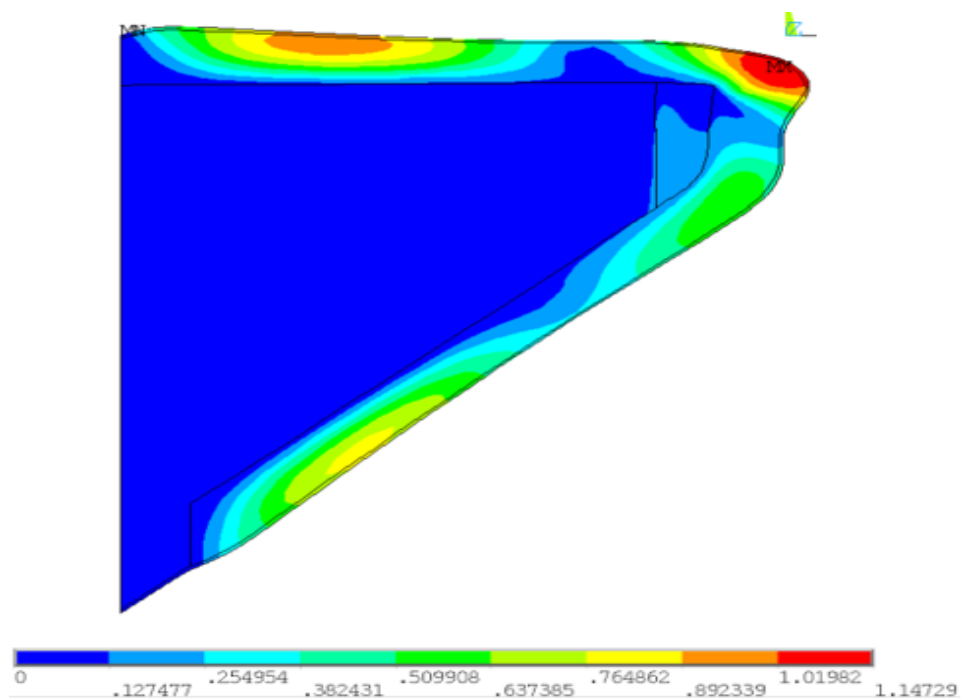
Obr. 36 První tvar kmitů – amplituda posuvů



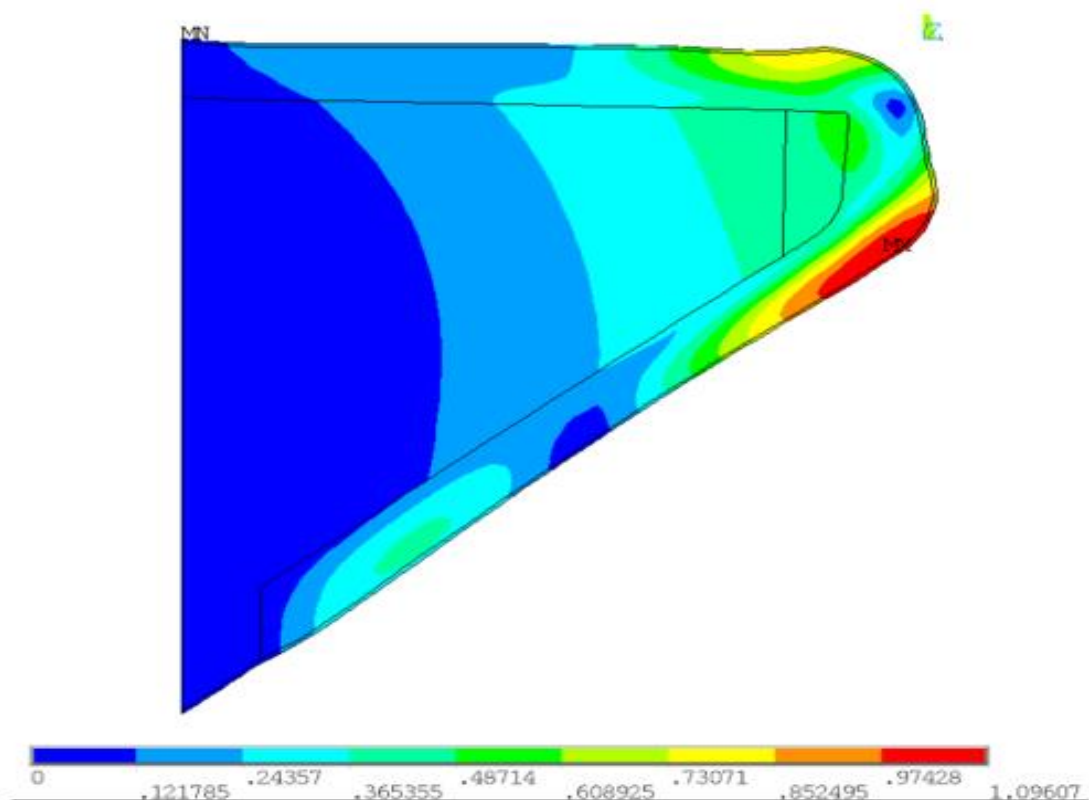
Obr.37 Druhý tvar kmitů – amplituda posuvů



Obr.38 Třetí tvar kmitů – amplituda posuvů



Obr.39 Čtvrtý tvar kmitů – amplituda posuvů



Obr.40 Pátý tvar kmitů – amplituda posuvů

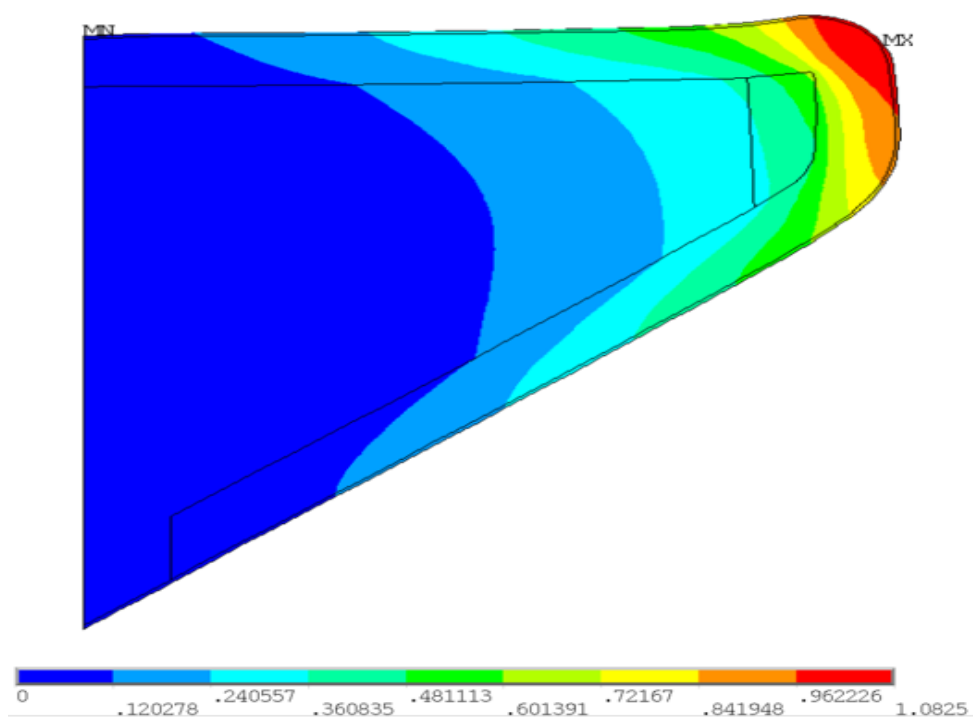
První vlastní frekvence vyšla 64.248 Hz a tvar kmitu hlasivky v tomto módu je nahoru a dolů, druhá vlastní frekvence vyšla 95.854 Hz a tvar kmitu hlasivky je zde doleva a doprava. Bylo počítáno prvních patnáct vlastních frekvencí, kde poslední vychází 190.16 Hz.

Dále jsou uvedeny výsledky pro variantu s modulem pružnosti v tahu povrchové laminy $E_{PLP} = 400 \text{ Pa}$ (viz tabulka 4), kdy tato hodnota je používána v modelech s interakcí hlasivek s proudem vzduchu. Bylo počítáno prvních třicet vlastních frekvencí a prvních patnáct je uvedeno v tabulce 7.

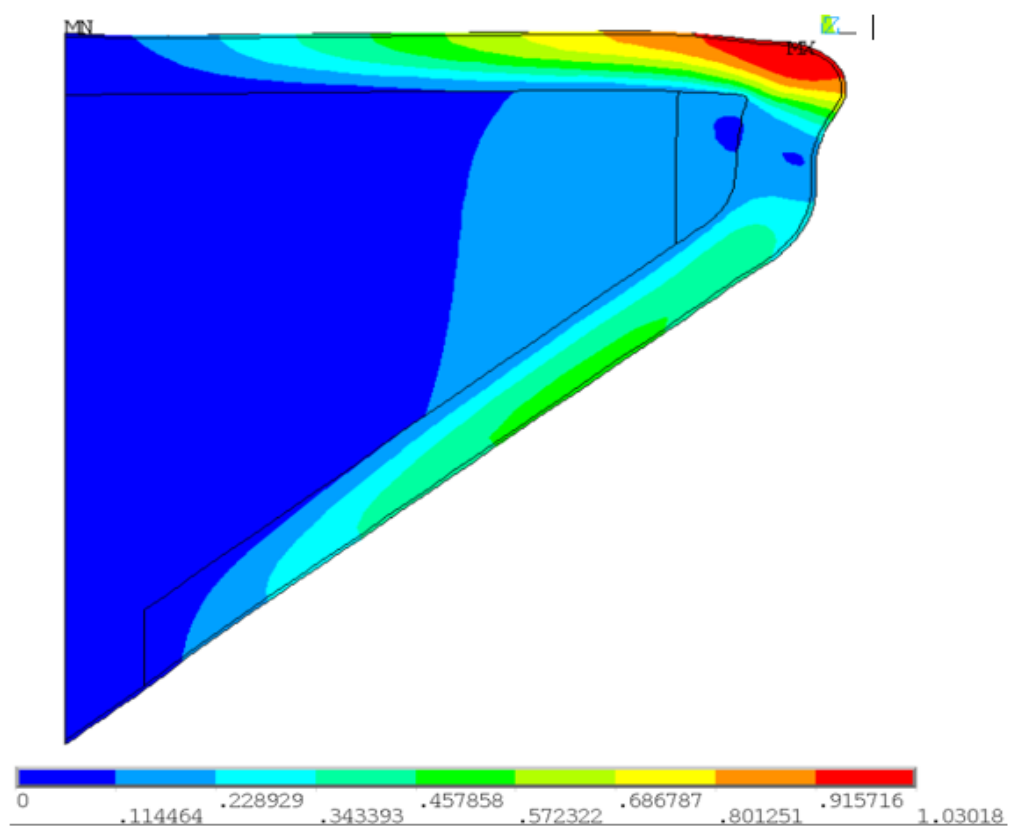
Tabulka 7 - prvních patnáct vlastních frekvencí pro $E_{PLP} = 400 \text{ Pa}$

Mód	Frekvence [Hz]
1	79,620
2	136,65
3	147,24
4	158,93
5	185,37
6	197,32
7	213,13
8	226,86
9	238,68
10	245,39
11	253,02
12	254,39
13	258,66
14	262,93
15	267,69

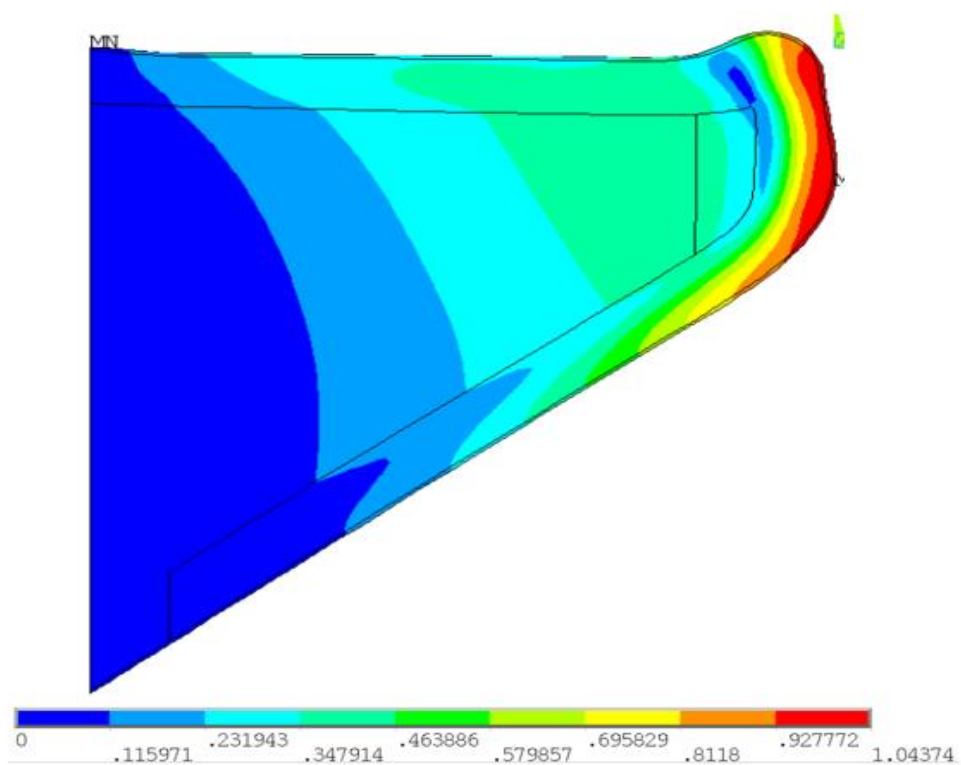
Na následujících obrázcích 41 až 45 je zobrazeno prvních pět tvarů kmitů. Barevnými mapami je zobrazena amplituda posuvů.



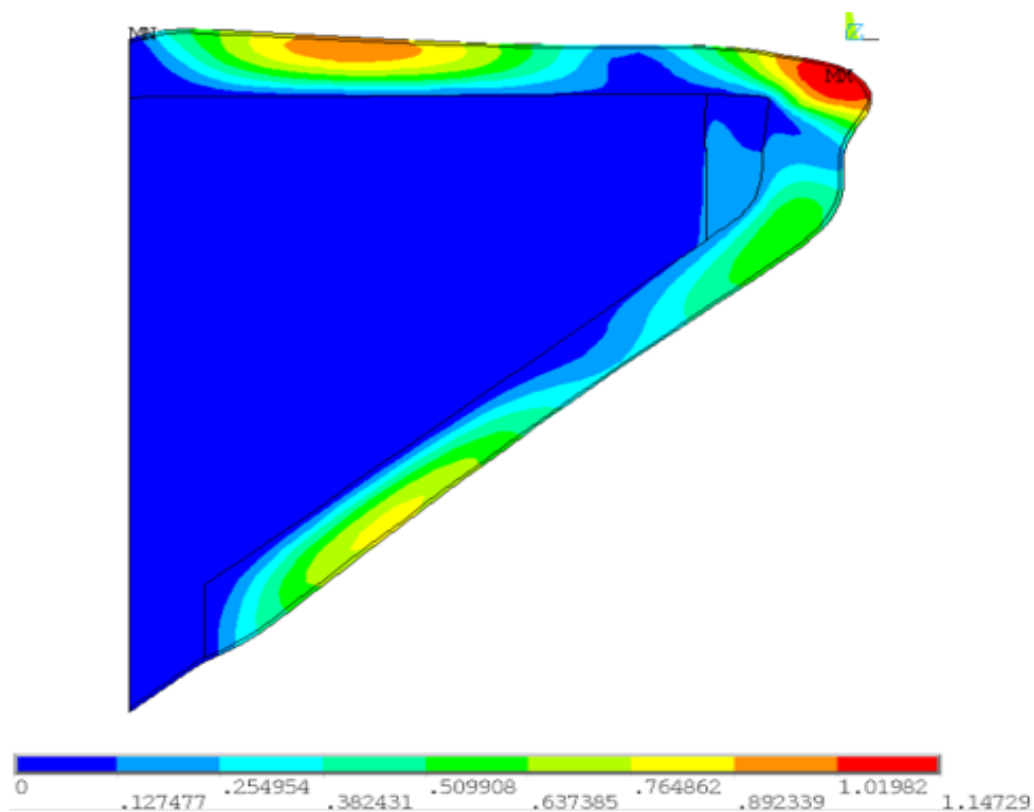
Obr. 41 První tvar kmitů – amplituda posuvů



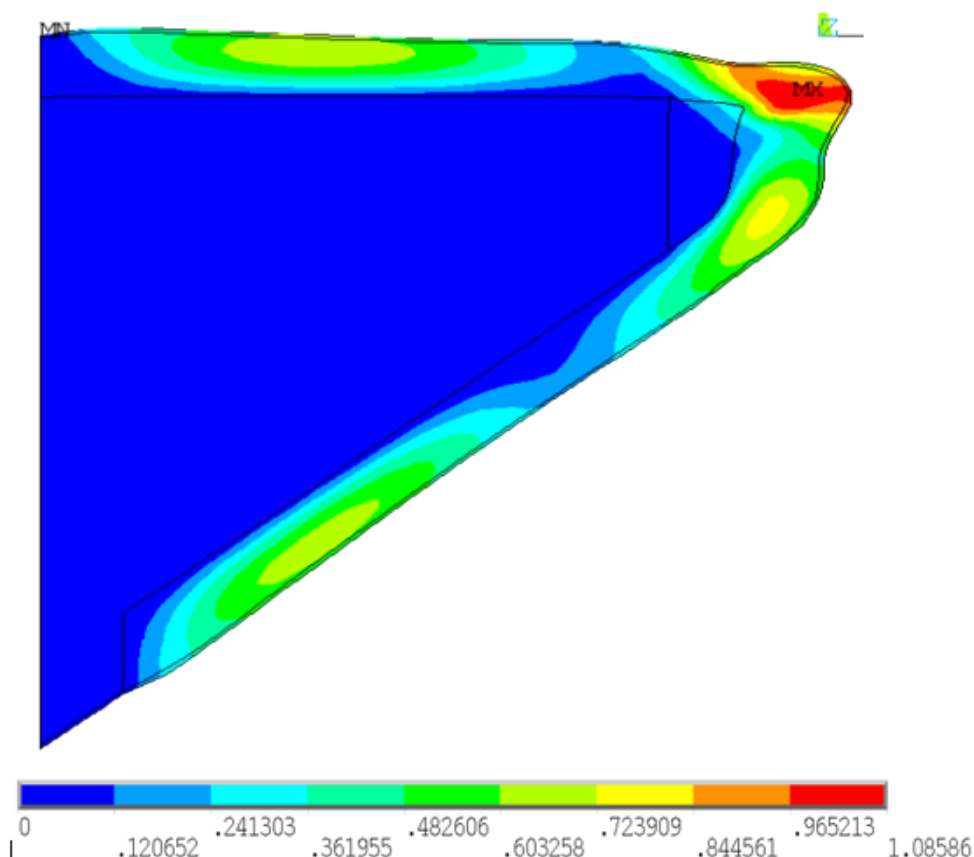
Obr. 42 Druhý tvar kmitů – amplituda posuvů



Obr. 43 Třetí tvar kmitů – amplituda posuvů



Obr.44 Čtvrtý tvar kmitů – amplituda posuvů



Obr. 45 Pátý tvar kmitů – amplituda posuvů

První vlastní frekvence vyšla 79,620 Hz a tvar kmitu hlasivky v tomto módu je nahoru a dolů, druhá vlastní frekvence vyšla 136,65 Hz a tvar kmitu hlasivky je zde doleva a doprava. Dále jsou uvedeny další tři módy, přičemž je napočítáno prvních patnáct vlastních frekvencí, kde poslední vychází 267,69 Hz.

Při srovnání obou variant vidíme, že vycházejí stejné tvary kmitů a vlastní frekvence rostou při zvýšení modulu pružnosti v tahu povrchové laminy proprii. Rozdíl první vlastní frekvence mezi oběma variantami je přibližně 15 Hz, druhé vlastní frekvence pak přibližně 41 Hz. Poslední vlastní frekvence pak vykazuje rozdíl přibližně 77 Hz. Vypočtené hodnoty vlastních frekvencí odpovídají fyziologickým hodnotám frekvence kmitání lidských hlasivek [26].

9 PŘECHODOVÁ ANALÝZA

Šíření slizniční vlny bylo následně analyzováno pomocí přechodové analýzy jako odezva hlasivky na rázové buzení silou na spodní část hlasivky. Při použití metody konečných prvků (MKP), lze pohybové rovnice struktury tkáně hlasivek zapsat v maticovém tvaru následovně:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F^A\} \quad (2.5)$$

$[M]$ - Strukturální matice hmotnosti

$[C]$ - Strukturální matice tlumení

$[K]$ - Strukturální matice tuhosti

$\{\ddot{u}\}$ - Uzlový vektor zrychlení

$\{\dot{u}\}$ - Uzlový vektor rychlosti

$\{u\}$ - Uzlový vektor výchylek

$\{F^A\}$ – Vektor budících sil

Pro řešení soustavy rovnic přímou integrací v časové oblasti se v ANSYSU používá Newmarkova metoda.

9.1 Stanovení koeficientů proporcionálního tlumení

Pro řešení rovnice (2.5) je potřeba zjistit matici tlumení ($[C]$). Konstanty tlumení však většinou nejsou známy nebo je velmi složité je určit. Proto se používá proporcionální tlumení, kde lze matici tlumení vyjádřit jako:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2.6)$$

- $\alpha[M]$ – Konstrukční tlumení
- $\beta[K]$ – Materiálové tlumení

Koeficienty α a β se nazývají koeficienty konstrukčního tlumení a materiálového tlumení. Tyto hodnoty se určují experimentálně pro dvě známé hodnoty vlastních úhlových frekvencí, a pro dvě známé hodnoty poměrných útlumů b_{p1} a b_{p2} , dle rovnice:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\Omega_1} & \Omega_1 \\ \frac{1}{\Omega_2} & \Omega_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2b_{p1} \\ 2b_{p2} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Členy b_{p1} a b_{p2} byly pro naši práci uvažovány na základě hodnot z literatury [26] v rozsahu $b_{p1}=0.015-0.40$ a $b_{p2}=0.02-0.5$.

Hodnoty vlastních frekvencí pro výpočet získáme na základě výsledků netlumené modální analýzy hlasivek, kde budeme uvažovat první a druhou vlastní frekvenci f_1 a f_2 . Tyto vlastní frekvence, přepočítáme na vlastní úhlové frekvence a dosadíme do vztahu (2.7) a vypočteme koeficienty.

První a druhý tvar byl zvolen na základě podobnosti se skutečným kmitáním hlasivek, kde první tvar vykazuje především pohyb nahoru a dolů. Druhý tvar pak představuje pohyb především doleva a doprava.

Řešením obou rovnic potom dostaneme koeficienty konstrukčního tlumení a materiálového tlumení uvedené v Tabulce 8.

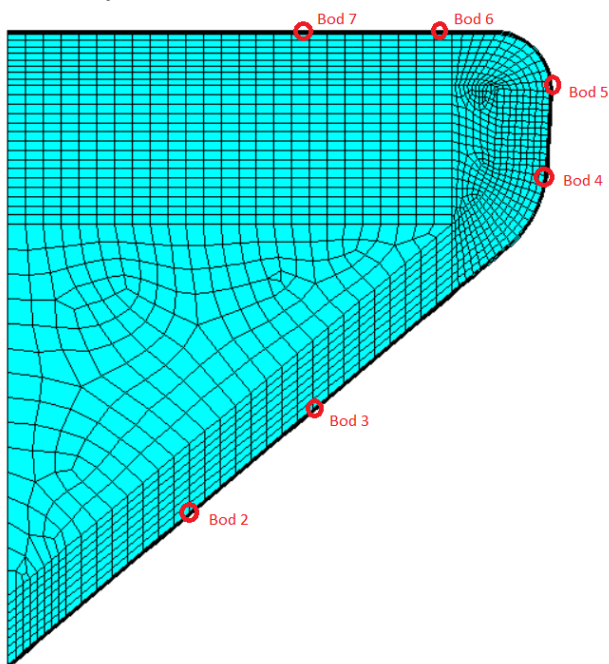
Tabulka 8 - jednotlivé varianty tlumení

Č.varianty	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	b_{p1}	b_{p2}	α [s^{-1}]	β [s]
1	64,248	95,864	0,015	0,02	2.339299	0.00005996
2	64,248	95,864	0,08	0,10	19.02507	0.00027960
3	64,248	95,864	0,16	0,20	38.05014	0.00055920
4	64,248	95,864	0,25	0,30	71.73237	0.00079841
5	64,248	95,864	0,35	0,40	120.0718	0.00099722
6	64,248	95,864	0,40	0,50	168.4111	0.00119602

Okrajové podmínky

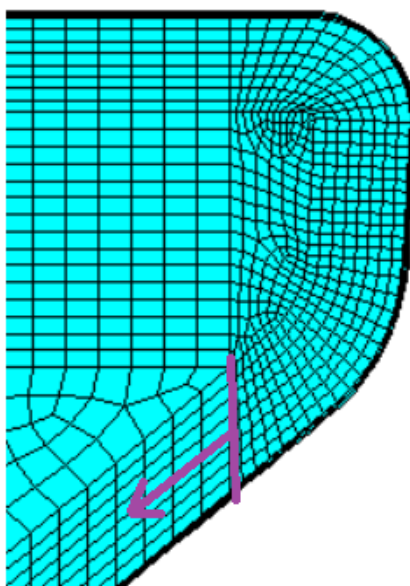
Pro náš případ bude uvažované vetknutí (v programu ANSYS zobrazeno modrými trojúhelníky) na laterální straně hlasivky. Tedy stejné jako okrajové podmínky u modální analýzy (viz obr. 33).

Na dalším obrázku 46 je vidět poloha vyšetřovaných bodů pro následné vyhodnocení pohybu bodů zpracovávané v Matlabu.



Obr.46 Zobrazení polohy vyšetřovaných bodů pro pohyb

Na dalším obrázku 47 je zobrazeno zatížení tak, jak bylo uvažováno při přechodové analýze. Síla byla situována do označené hrany. Síla je velikosti $F=0.005\text{ N}$ v každém uzlu jsou vybrané hrany (12 uzlů sítě $\cdot 0.005\text{ N} \Rightarrow$ celková síla 0.06 N) Do času 0.001 s proběhlo natažení hlasivky a poté došlo k uvolnění. Fáze natažení je v programu ANSYS počítána jako přechodová analýza s vypnutými přechodovými efekty (tedy zrychlení a rychlost je nula).



Obr.47 Zobrazení zatížení při přechodové analýze

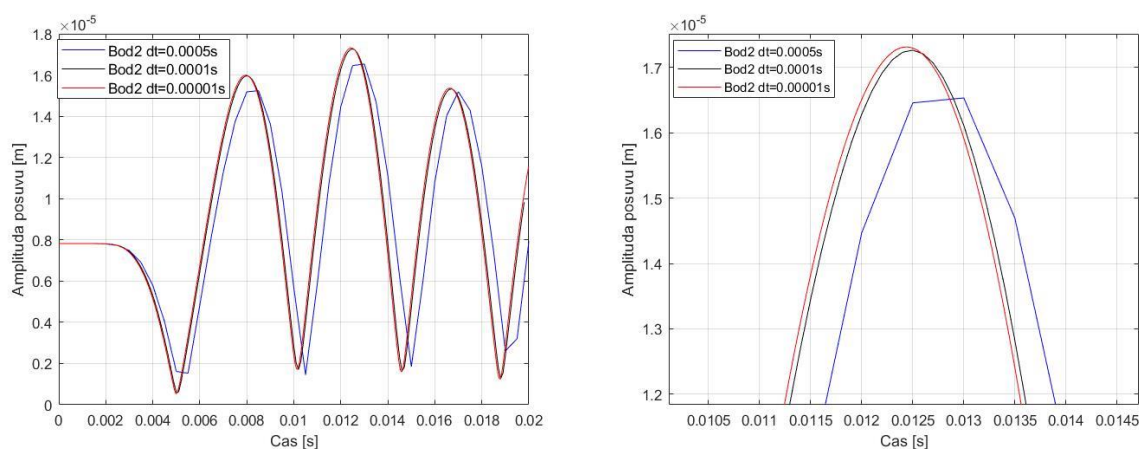
9.2 Vliv velikosti časového kroku

Nejdříve byl testován vliv velikosti časového kroku. V ANSYS help [19] je uveden vztah pro doporučenou velikost časového kroku:

$$d_t = \frac{1}{20f_{\max}} \quad (2.8)$$

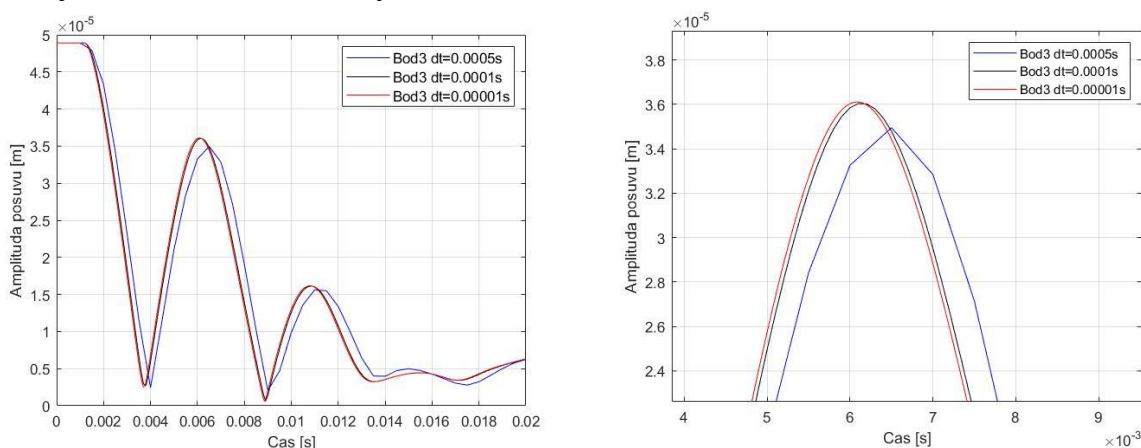
Lidské hlasivky kmitají přibližně v rozmezí 70-300 Hz pro běžný hlas, proto byla volena jako f_{\max} 500 Hz. Po dosazení do vztahu (2.8) vyjde časový krok 0.0001s. Byly testovány časové kroky 0.0005 s, 0.0001 a 0.00001s. Test byl prováděn pro variantu původní charakteristik tedy modul pružnosti v tahu povrchové laminy proprii 400 Pa, modul pružnosti v tahu epitelu 5000 Pa, konstrukční tlumení 116.52 s^{-1} a materiálové tlumení 0.0003 s.

Na následujícím obrázku 48 můžeme vidět vypočtené amplitudy posuvů pro bod 2 a jednotlivé časové kroky.



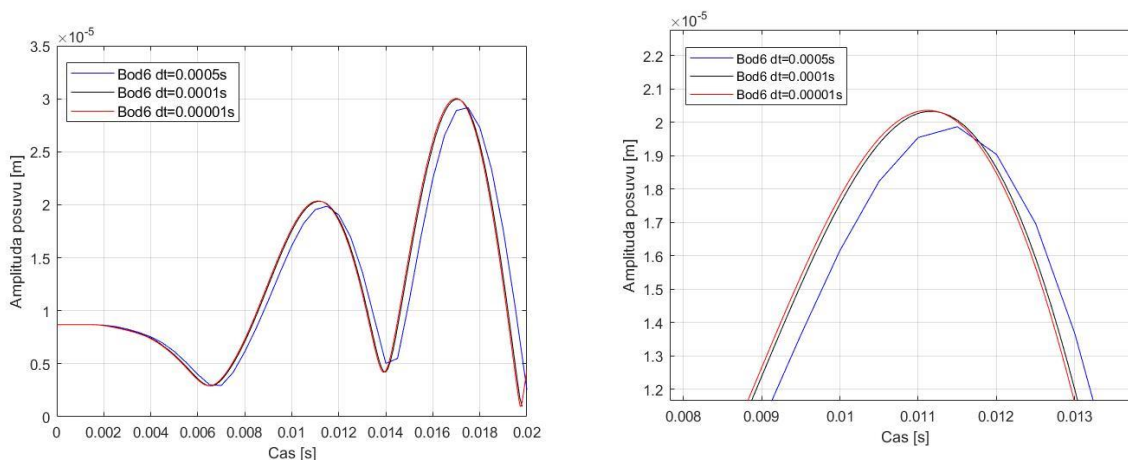
Obr.48 Amplitudy posuvů pro bod 2 a jednotlivé časové kroky, vlevo celkový čas, vpravo detail

Na následujícím obrázku 49 můžeme vidět amplitudy posuvů pro bod 3 a jednotlivé časové kroky.



Obr. 49 Amplitudy posuvů pro bod 3 a jednotlivé časové kroky, vlevo celkový čas, vpravo detail

Na následujícím obrázku 50 můžeme amplitudy posuvů pro bod 6 a jednotlivé časové kroky.

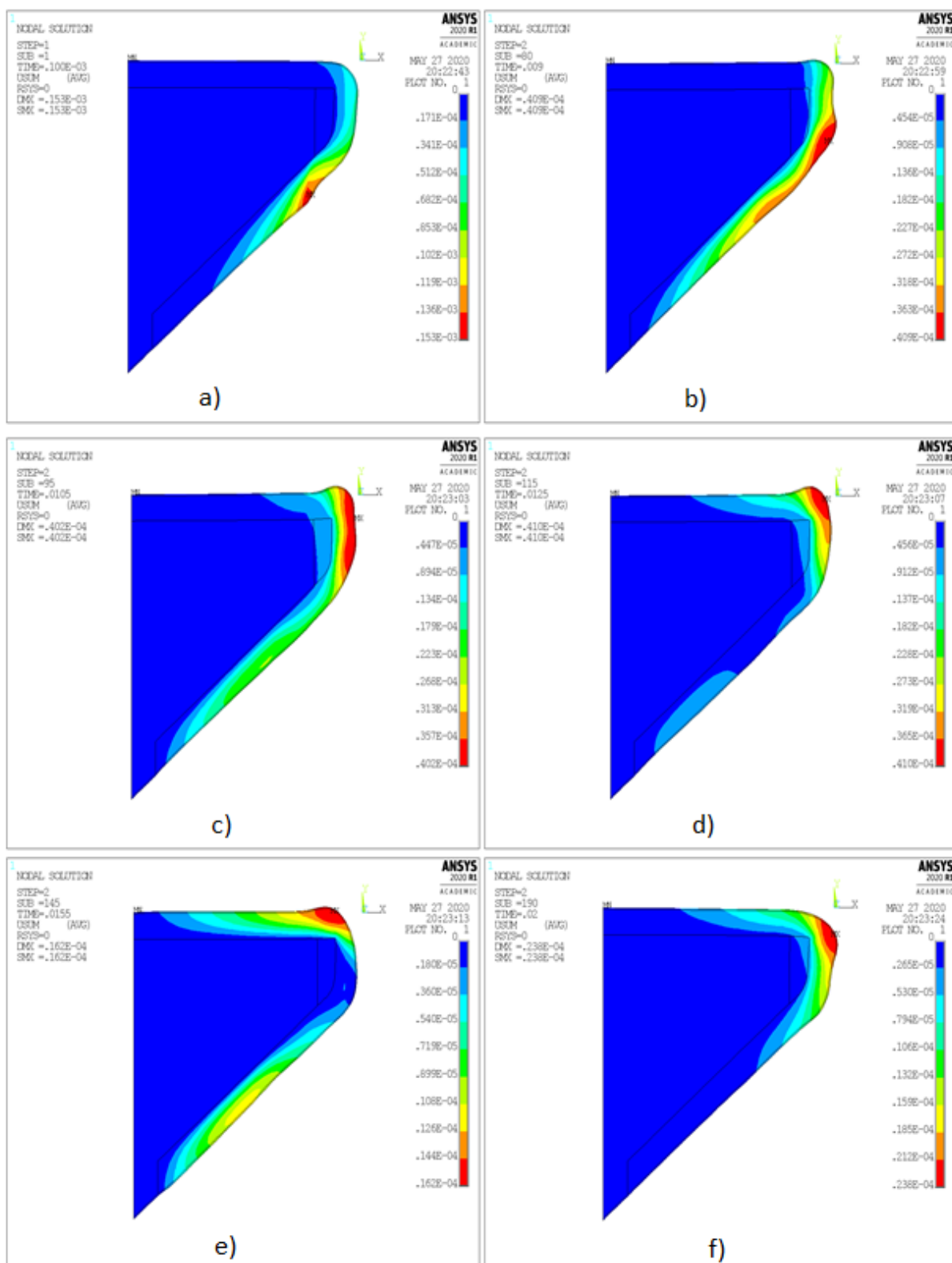


Obr.50 Amplitudy posuvů pro bod 6 a jednotlivé časové kroky, vlevo celkový čas, vpravo detail

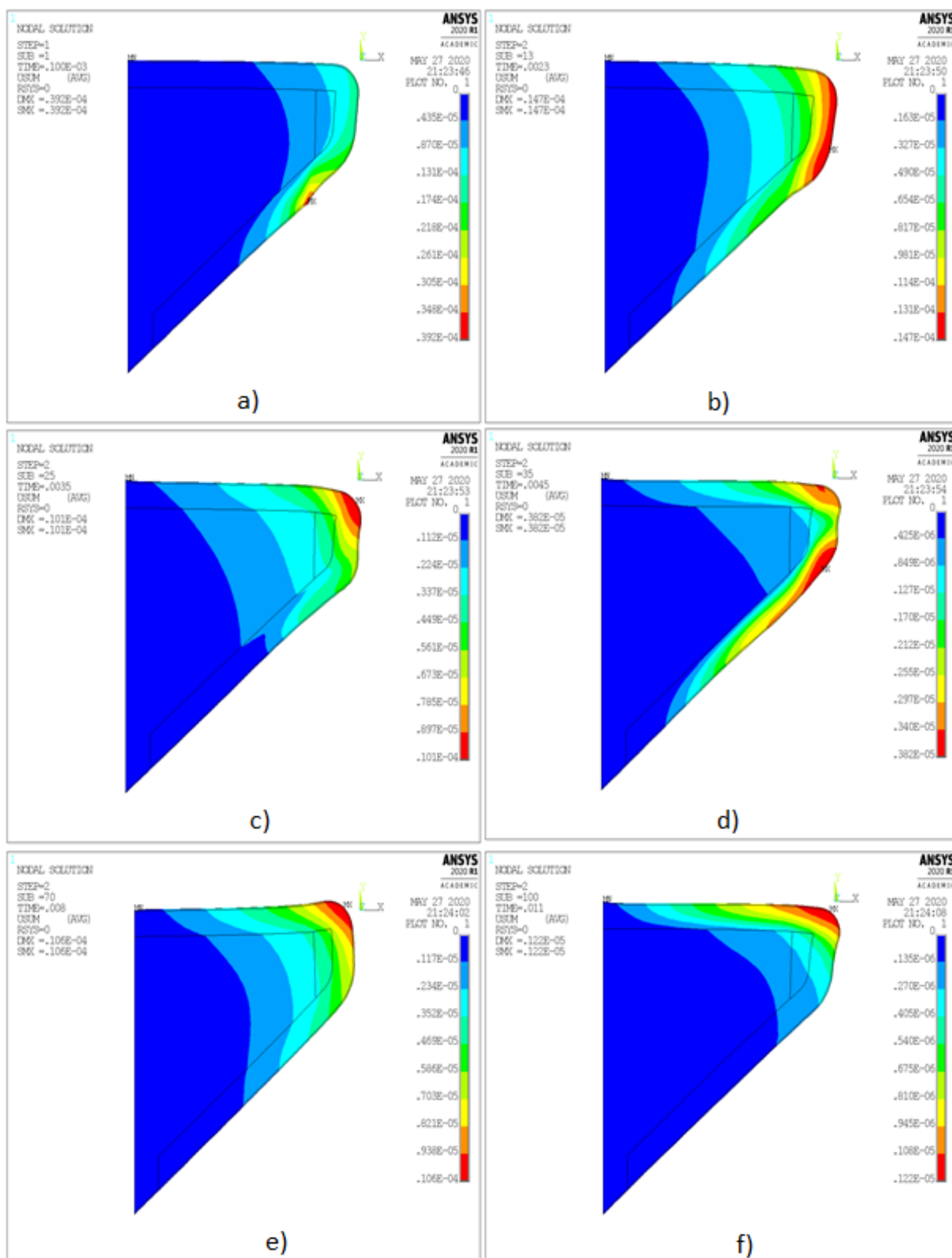
Z výše uvedených obrázků lze vidět, že mezi jemnějšími variantami časového kroku tedy 0.0001s a 0.00001s není moc znatelný rozdíl, a to v žádném bodě, avšak při hrubším časovém kroku 0.0005s se už vyskytují větší odchylky. Proto byl z důvodu časové náročnosti výpočtu volen časový krok 0.0001s.

K vyhodnocení rychlosti slizniční vlny dochází v matlabu, pomocí funkce „fpeaks“ jsou nalezeny vrcholy a ze známé vzdálenosti dráhy podělené časem je poté vypočtena rychlost mezi požadovanými body, přičemž v práci počítáme rychlosti mezi body 2-3 a 5-6.

Na obrázku 51 jsou zobrazeny výsledky transientní analýzy pro časový krok $dt=0.001$ s a nejměkčí variantu povrchové laminy proprii, kde je modul pružnosti v tahu povrchové laminy proprii 100 Pa, modul pružnosti v tahu epitelu 5000 Pa, konstrukční tlumení 116.52 s^{-1} a materiálové tlumení 0.0003 s. V jednotlivých časových krocích jsou zobrazeny výsledky analýzy, přičemž na obrázku e) je přibližně zobrazený pohyb při rychlosti mezi body 5 a 6. Na obrázku 52 jsou zobrazeny výsledky pro modul pružnosti v tahu povrchové laminy proprii 1600 Pa, modul pružnosti v tahu epitelu 5000 Pa, konstrukční tlumení 116.52 s^{-1} a materiálové tlumení 0.0003 s. Při těchto parametrech docházelo ke kmitání bodů 5 a 6 téměř ve stejné fázi. Toto chování přetrvávalo, i když byl počítán delší časový úsek (0-0.3s).



Obr.51 Vypočtené amplitudy posuvů v jednotlivých časových krocích pro nejměkčí variantu PLP a) 0.0003 s; b) 0.009 s; c) 0.0105 s; d) 0.0125 s; e) 0.0155 s; f) 0.02 s



Obr.52 Vypočtené amplitudy posuvů v jednotlivých časových krocích pro nejtužší variantu PLP a) 0.0003 s; b) 0.0023 s; c) 0.0035 s; d) 0.0045 s; e) 0.008 s; f) 0.011 s

9.3 Výsledky přechodové analýzy

V následující tabulce 9 jsou uvedeny rychlosti slizniční vlny mezi body 2-3 a mezi body 5-6. Je zde uvedena závislost rychlosti na změně modulu pružnosti v tahu povrchové laminy proprii. Neměnné parametry jsou zde: modul pružnosti v tahu epitelu 5000 Pa, konstrukční tlumení 116.52 s^{-1} a materiálové tlumení 0.0003 s. A proměnnou je zde modul pružnosti v tahu povrchové laminy proprii (PLP)

Tabulka 9 – rychlost slizniční vlny – vliv tuhosti povrchové laminy proprii (PLP)

Modul pružnosti v tahu PLP [Pa]	Rychlost vlny [m/s]	
	2-3	5-6
100	2.0159	1.2386
200	1.9098	1.5201
400	2.0159	2.0902
800	2.4191	4.1804
1600	2.7913	-

V následující tabulce 10 jsou uvedeny rychlosti slizniční vlny mezi body 2 a 3 a mezi body 5-6. Je zde uvedena závislost rychlosti na změně modulu pružnosti v tahu epitelu. Neměnné parametry jsou tedy: modul pružnosti v tahu povrchové laminy proprii 400 Pa, konstrukční tlumení 116.52 s^{-1} a materiálové tlumení 0.0003 s. Proměnný je zde modul pružnosti v tahu epitelu (Ep).

Tabulka 10 – rychlost slizniční vlny – vliv tuhosti epitelu (Ep)

Modul pružnosti v tahu epitelu [Pa]	Rychlost vlny [m/s]	
	2-3	5-6
10 000	3.0239	2.2295
15 000	4.0319	2.5725
25 000	6.0478	2.7869

V následující tabulce 11 jsou uvedeny rychlosti slizniční vlny mezi body 2-3 a mezi body 5-6. Je zde uvedena závislost rychlosti na změně konstrukčního tlumení a materiálového tlumení. Neměnné parametry tedy jsou: modul pružnosti v tahu povrchové laminy proprii 400 Pa, modul pružnosti v tahu epitelu 5000 Pa. A proměnné veličiny jsou materiálové tlumení a konstrukční tlumení.

Tabulka 11 – rychlosti slizniční vlny – vliv tlumení (α , β)

Parametry proporcionálního tlumení α [s^{-1}], β [s]	Rychlost vlny [m/s]	
	2-3	5-6
2.339299 0.000059	1.9098	2.2295
19.02507 0.000279	2.1345	2.0902
38.05014 0.000559	2.2679	2.7869
71.73237 0.000798	2.7913	3.0403
120.0718 0.000997	3.0239	4.1804
168.4112 0.001196	3.6287	5.5738

V následující tabulce 12 jsou uvedeny amplitudy pro body 2,3,5 a 6. Jsou zde uvedené závislosti amplitudy na modulu pružnosti v tahu povrchové laminy proprii. Neměnné parametry jsou: modul pružnosti v tahu epitelu 5000 Pa, konstrukční tlumení $116.52\ s^{-1}$ a materiálové tlumení $0.0003\ s$. Proměnný je zde modul pružnosti v tahu povrchové laminy proprii (PLP).

Tabulka 12 – amplitudy slizniční vlny – vliv tuhosti povrchové laminy proprii (PLP)

Modul pružnosti v tahu PLP [Pa]	Amplituda [m]			
	2	3	5	6
100	3.2068e-05	5.6534e-05	6.3913e-05	1.9169e-05
200	1.8086e-05	3.5996e-05	4.2592e-05	1.4645e-05
400	8.9120e-06	2.0346e-05	2.6706e-05	1.1112e-05
800	4.0550e-06	9.6827e-06	1.6455e-05	8.5561e-06
1600	1.6326e-06	3.4843e-06	1.6640e-06	8.2844e-07

V následující tabulce 13 jsou uvedeny amplitudy pro body 2,3,5 a 6. Jsou zde uvedené závislosti amplitudy na modulu pružnosti v tahu epitelu. Neměnné parametry jsou tedy: modul pružnosti v tahu povrchové laminy propří 400 Pa, konstrukční tlumení 116.52 s^{-1} a materiálové tlumení 0.0003 s . Proměnný je zde modul pružnosti v tahu epitelu.

Tabulka 13 – amplitudy slizniční vlny – vliv tuhosti epitelu (E_p)

Modul pružnosti v tahu epitelu [Pa]	Amplituda [m]			
	2	3	5	6
10 000	9.2813e-06	1.7525e-05	2.4308e-05	1.0560e-05
15 000	9.1191e-06	1.5850e-05	2.2541e-05	9.8325e-06
25 000	8.4376e-06	1.3897e-05	2.0019e-05	8.5220e-06

V následující tabulce 14 jsou uvedeny amplitudy pro body 2,3,5 a 6. Jsou zde uvedené závislosti amplitudy na konstrukčním tlumení a materiálovém tlumení. Neměnné parametry tedy jsou: modul pružnosti v tahu povrchové laminy propří 400 Pa, modul pružnosti v tahu epitelu 5000 Pa. A proměnné veličiny jsou materiálové tlumení a konstrukční tlumení.

Tabulka 14 – amplitudy slizniční vlny-vliv tlumení (α , β)

Parametry proporcionálního tlumení α [s^{-1}], β [s]	Amplituda [m]			
	2	3	5	6
2.339299 0.000059	1.5961e-05	3.6033e-05	3.5600e-05	2.9957e-05
19.02507 0.000279	1.2083e-05	2.6950e-05	3.7870e-05	1.6207e-05
38.05014 0.000559	8.7370e-06	1.9733e-05	3.0574e-05	1.2548e-05
71.73237 0.000798	6.3242e-06	1.4484e-05	2.4240e-05	9.6081e-06
120.0718 0.000997	4.5063e-06	1.0398e-05	1.8581e-05	7.1499e-06
168.4112 0.001196	3.1357e-06	7.2744e-06	1.4066e-05	5.2763e-06

9.4 Hodnocení výsledků

Jak je vidět z tabulky 9, rychlost slizniční vlny roste v závislosti na vyšší tuhosti povrchové laminy proprii (PLP). Pro nejměkčí variantu 100 Pa, dosahuje rychlost mezi body 2-3 2.0159 m/s a mezi body 5-6 1.2386 m/s. z tabulky je také vidět, že nárůst rychlosti mezi body 5-6 je daleko znatelnější. Pro variantu tuhosti 1600 Pa dokonce dochází ke kmitání ve fázi, výpočtem by se rychlost rovnala nekonečnu, proto ji zde nelze jednoznačně určit, mezi body 2-3 potom vychází 2.7913 m/s.

V tabulce 10 vidíme, že rychlosti se zvedají i s rostoucím modulem pružnosti v tahu epitelu. Zde je mnohem znatelnější nárůst mezi body 2-3, kde pro variantu tuhosti 10000 Pa dosahuje rychlosti 3.0239 m/s. Mezi body 5-6 dosahuje rychlost hodnoty 2.2295 m/s. Pro hodnotu 25 000 Pa pak rychlost mezi body 2-3 dosahuje hodnoty 6.0478 m/s a mezi body 5-6 dosahuje hodnoty 2.7869 m/s.

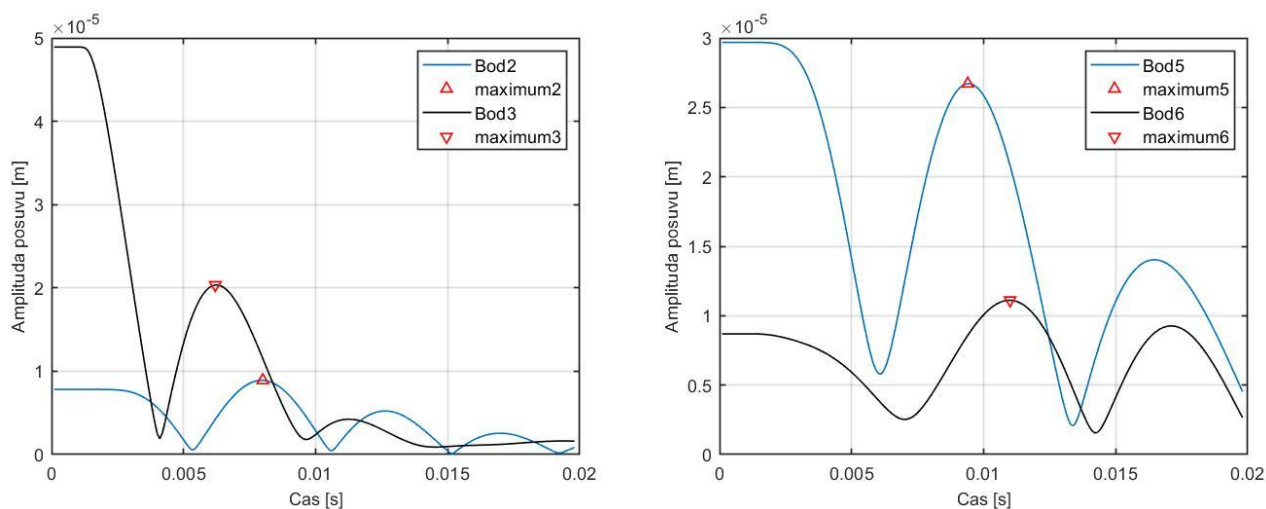
Z tabulky 11 vidíme, že rychlost šíření slizniční vlny se zvedá i se zvyšujícím se konstrukčním a materiálovým tlumením pro nejmenší tlumení $\alpha = 2.3393 \text{ s}^{-1}$ a $\beta = 0.0003$ s dosahuje rychlost mezi body 2-3 hodnoty 1.9098 m/s a mezi body 5-6 hodnoty 2.2295 m/s. Pro největší tlumení $\alpha = 168.4112 \text{ s}^{-1}$ a $\beta = 0.001196$ s dosahuje rychlost mezi body 2-3 hodnoty 3.6287 m/s a mezi body 5-6 hodnoty 5.5738 m/s. Což je možno vysvětlit tím, že pro větší hodnoty tlumení se slizniční vlna šíří hůře po povrchu hlasivky a hlasivka spíše kmitá jako celek a body na povrchu tak kmitají téměř ve fázi.

V tabulce 12 je vidět změna amplitudy v závislosti na zvyšujícím se modulu pružnosti v tahu povrchové laminy proprii s tím, že se zvyšující se tuhostí se ve všech bodech amplituda snižuje a mezi nejměkčí a nejtužší variantou je rozdíl téměř o jeden celý řád.

V tabulce 13 vidíme závislost změny amplitudy na modulu pružnosti v tahu epitelu, na rozdíl od předešlého případu zde není změna amplitudy se zvyšující se tuhostí tak výrazná, nicméně stále se ve všech bodech se zvyšující tuhostí snižuje.

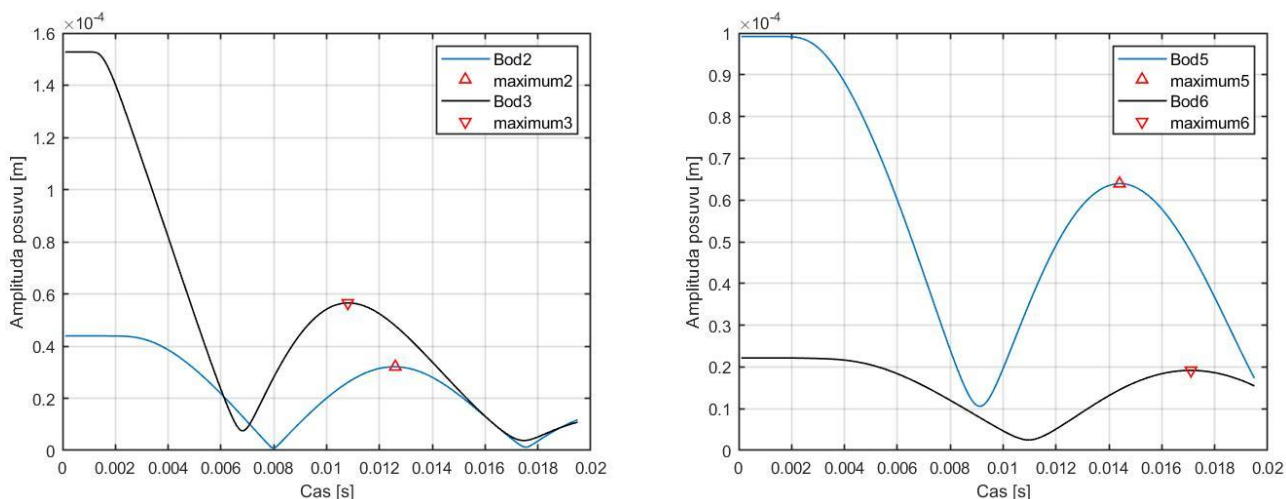
V tabulce 14 poté můžeme vidět závislost změny amplitudy na konstrukčním a materiálovém tlumení. Podobně jako v případě pro modul pružnosti v tahu lamini proprii se zde také ve všech bodech amplituda se zvyšujícím tlumením zmenšuje, a také tak výrazně, že mezi nejméně a nejvíce tlumenou variantou se amplituda sníží téměř o celý řád.

Na následujícím obrázku číslo 53 je vidět výsledek výpočtů v matlabu pro původní charakteristiky. Modul pružnosti v tahu povrchové laminy proprie 400 Pa, modul pružnosti v tahu epitelu 5000 Pa, konstrukční tlumení 116.52 s^{-1} a materiálové tlumení 0.0003 s , kde tento případ budeme brát jako výchozí a budeme jej s ostatními výsledky porovnávat.



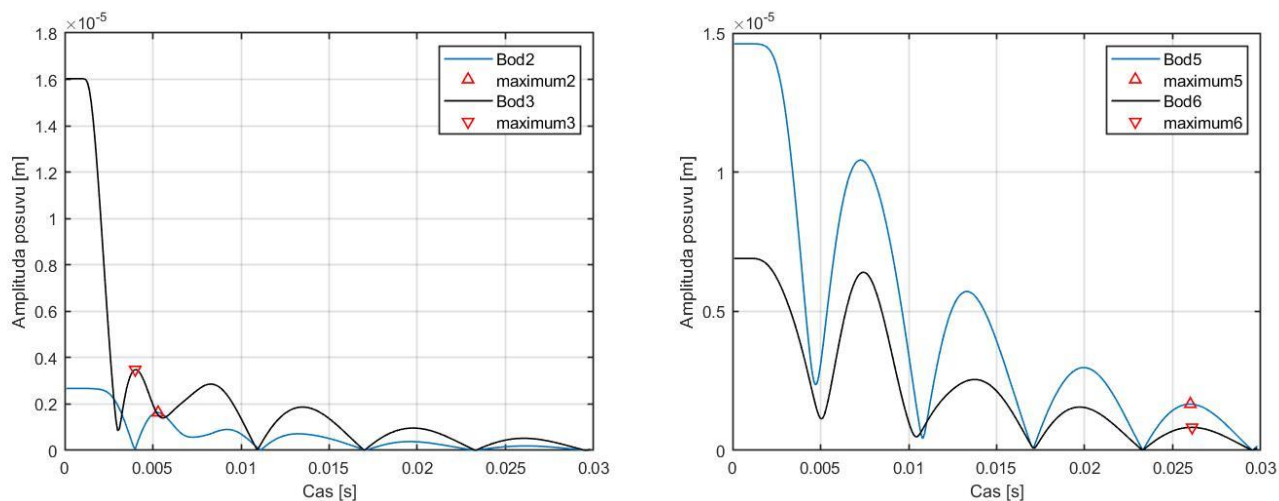
Obr.53 Amplitudy posuvů pro bod 2 a bod 3 vlevo, bod 5 a bod 6 vpravo s označenými maximy pro původní materiálové charakteristiky

Na následujícím obrázku 54 je vidět výsledek výpočtu v matlabu pro nejmenší modul pružnosti v tahu povrchové laminy proprie 100 Pa, konstrukční tlumení 116.52 s^{-1} , materiálové tlumení 0.0003 s a modul pružnosti v tahu epitelu 5000 Pa.



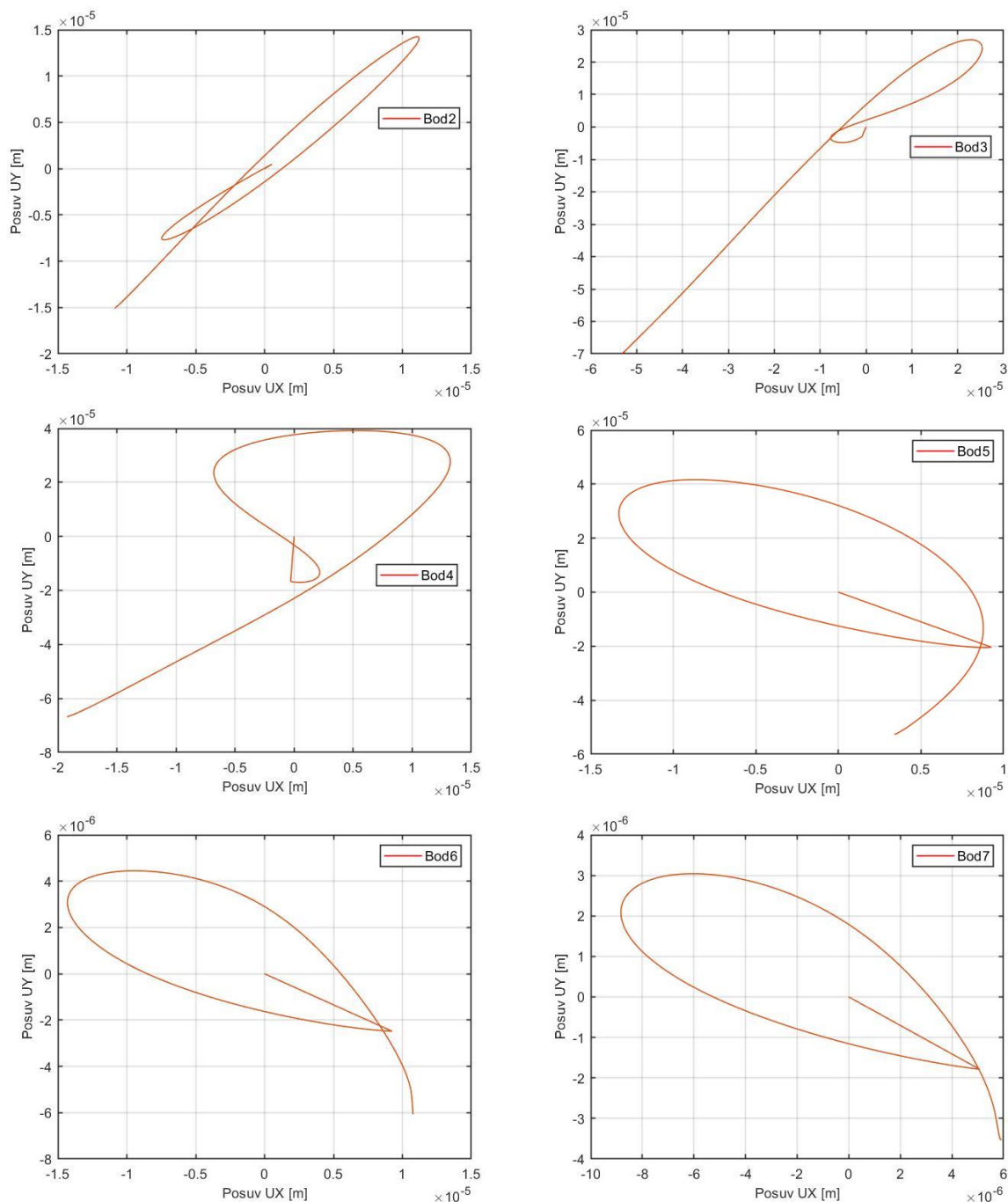
Obr.54 Amplitudy posuvů pro bod 2 a bod 3 vlevo, bod 5 a bod 6 vpravo s označenými maximy pro nejmenší modul pružnosti v tahu PLP

Na následujícím obrázku číslo 55 jsou vidět výsledky pro největší modul pružnosti v tahu povrchové laminy proprii 1600, konstrukční tlumení 116.52 s^{-1} , materiálové tlumení 0.0003 s a modul pružnosti v tahu epitelu 5000 Pa . Kde na pravém grafu můžeme vidět, že kmitá ve fázi, proto nejde určit rychlost. Pro ověření tohoto faktu byl zvětšen časový krok z 0.02 s na 0.03 s .



Obr.55 Amplitudy posuvů pro bod 2 a bod 3 vlevo, bod 5 a bod 6 vpravo s označenými maximy pro největší modul pružnosti v tahu PLP

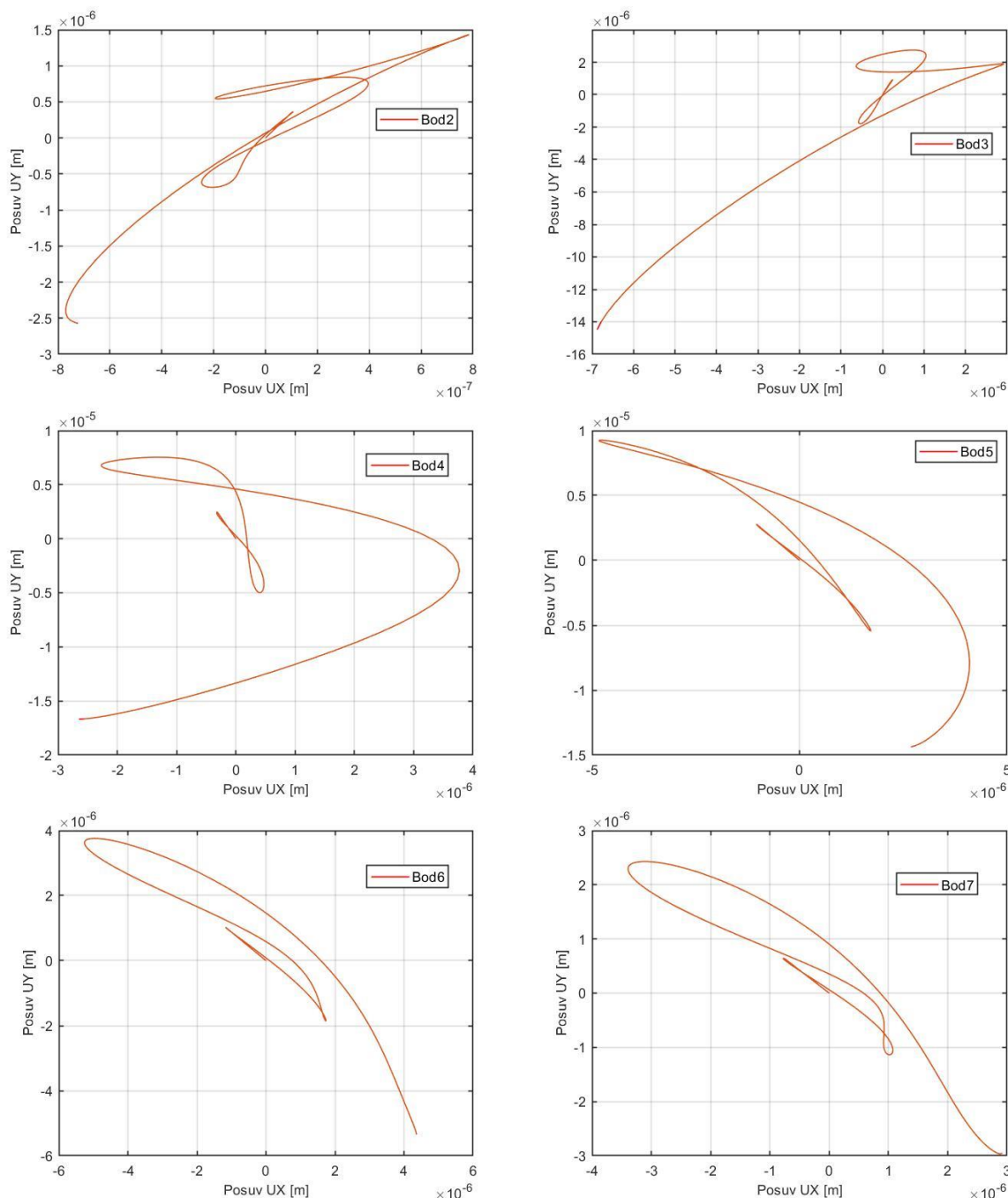
Zde je znázorněn pohyb bodů 2, 3, 4, 5, 6 a 7 na po sobě jdoucích grafech v matlabu (Znázorněno na obrázku 56), následující vyobrazení je pro nejmenší modul pružnosti v tahu povrchové laminy proprii 100 Pa, konstrukční tlumení 116.52 s^{-1} , materiálové tlumení 0.0003 s a modul pružnosti v tahu epitelu 5000 Pa.



Obr.56 Vypočtené posuvy v osách x a y jednotlivých vyhodnocovaných bodů pro nejmenší modul pružnosti v tahu PLP

U bodů 2-3 jde dle obrázků téměř o podélné kmitání, přičemž se přes body 4-5 pohyb transformuje na eliptický pohyb.

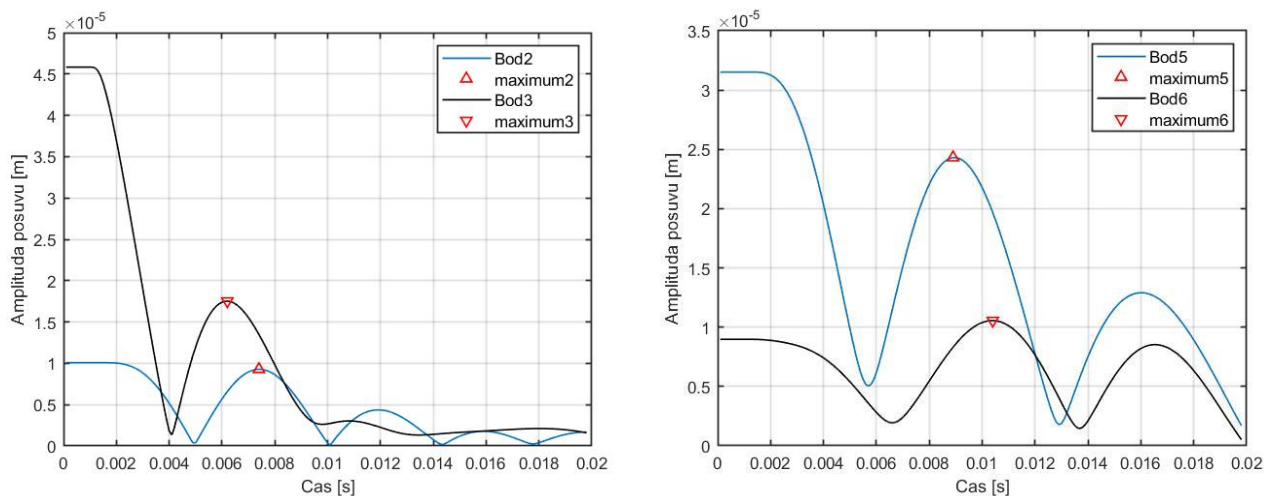
Zde je znázorněn pohyb bodů 2,3,4,5,6 a 7 na po sobě jdoucích grafech v matlabu (Znázorněno na obrázku 57), následující vyobrazení je pro nejmenší modul pružnosti v tahu povrchové laminy proprii 1600 Pa, konstrukční tlumení 116.52 s^{-1} , materiálové tlumení 0.0003 s a modul pružnosti v tahu epitelu 5000 Pa.



Obr.57 Vypočtené posuvy v osách x a y jednotlivých vyhodnocovaných bodů pro největší modul pružnosti v tahu PLP

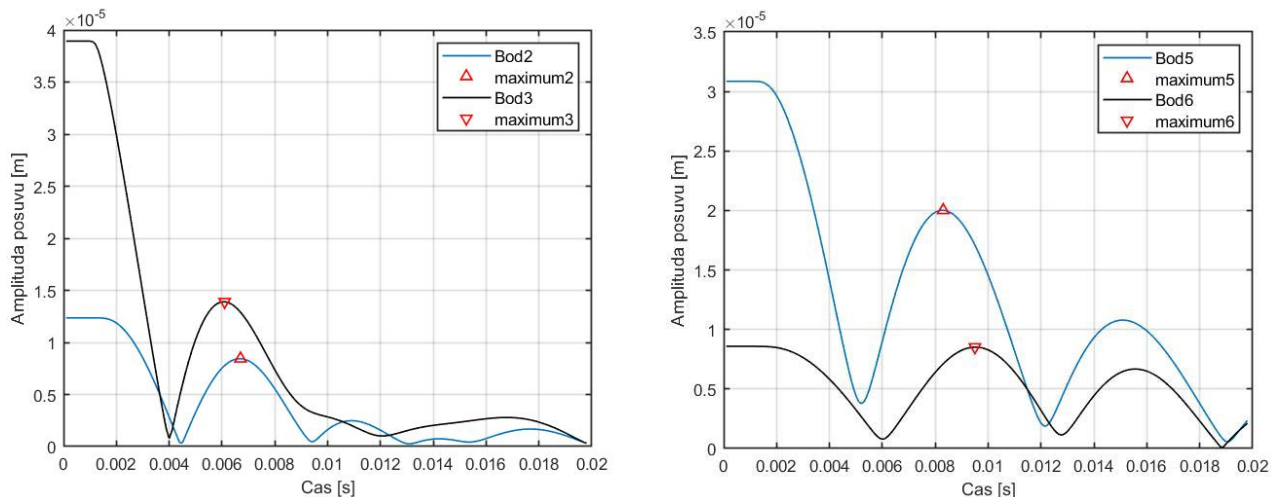
U bodů 2-3 jde dle obrázků téměř o podélné kmitání, přičemž se přes body 4-5 pohyb transformuje na eliptický pohyb. Na rozdíl od předešlého případu je zde u bodů 2-3 složitější tvar a eliptický pohyb u bodů 4-5 je s daleko menší výchylkou v ose x.

Na následujícím obrázku číslo 58 jsou vidět výsledky pro modul pružnosti v tahu epitelu 10 000 Pa, modul pružnosti v tahu povrchové laminy proprie 400 Pa, konstrukční tlumení 116.52 s^{-1} a materiálové tlumení 0.0003 s .



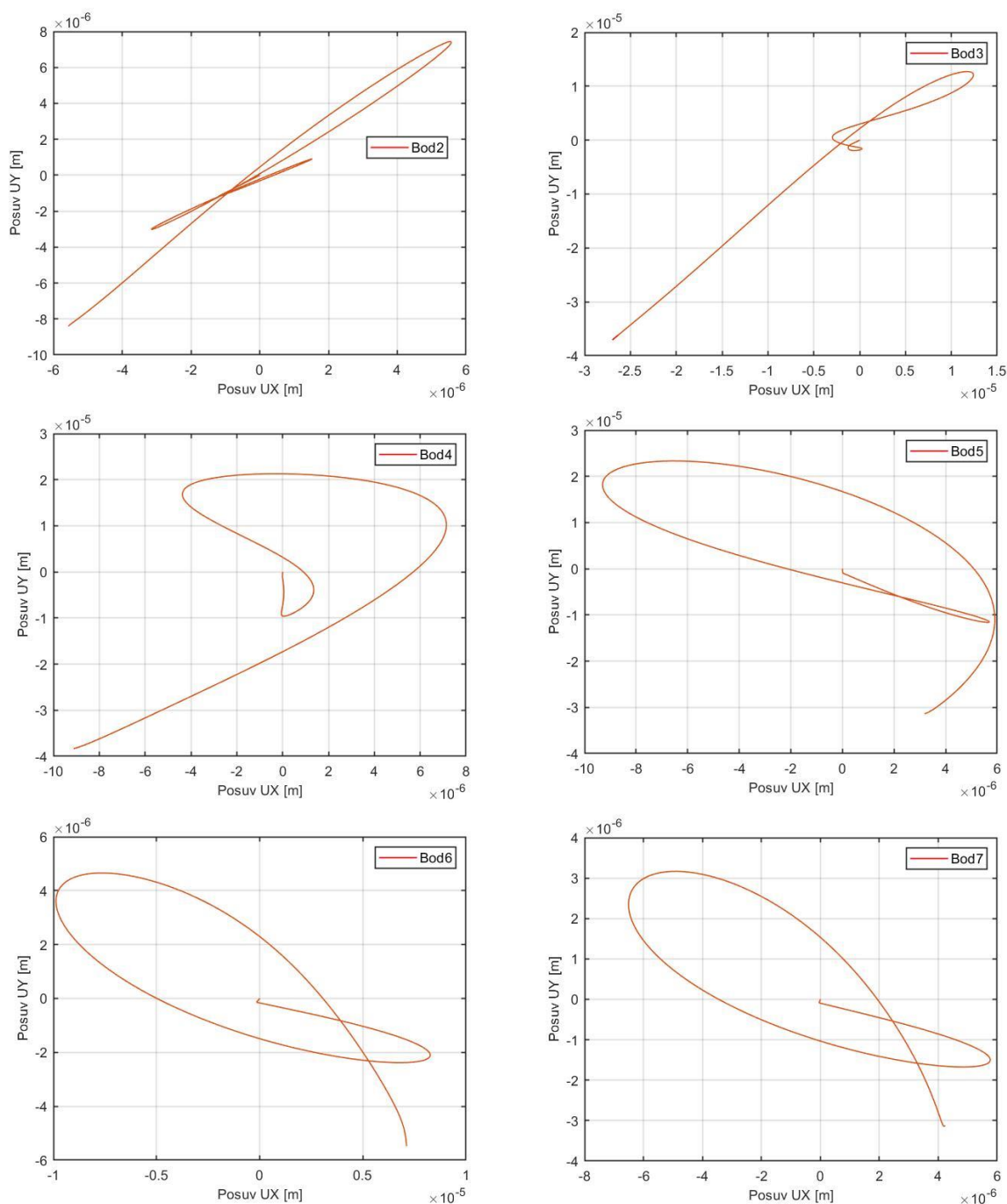
Obr. 58 Amplitudy posuvů pro bod 2 a bod 3 vlevo, bod 5 a bod 6 vpravo s označenými maximy pro modul pružnosti v tahu epitelu 10 000 Pa

Na následujícím obrázku číslo 59 jsou vidět výsledky pro modul pružnosti v tahu epitelu 25 000 Pa, modul pružnosti v tahu povrchové laminy proprie 400 Pa, konstrukční tlumení 116.52 s^{-1} a materiálové tlumení 0.0003 s .



Obr. 59 Amplitudy posuvů pro bod 2 a bod 3 vlevo, bod 5 a bod 6 vpravo s označenými maximy pro modul pružnosti v tahu epitelu 25 000 Pa

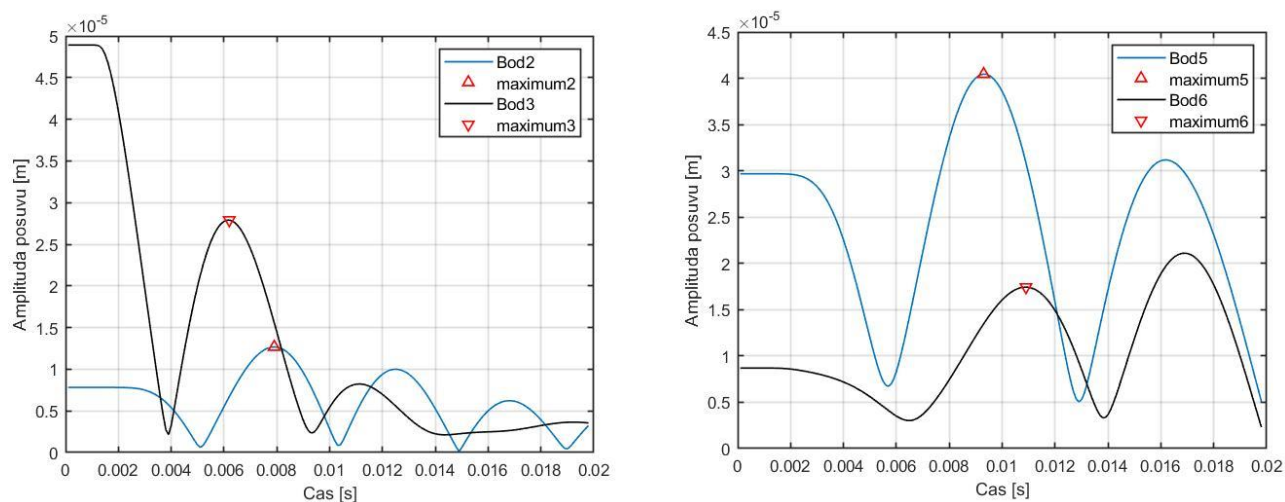
Zde je znázorněný pohyb bodů 2,3,4,5,6 a 7 na po sobě jdoucích grafech v matlabu (znázorněno na obrázku 60). Následující vyobrazení je pro modul pružnosti v tahu epitelu 10 000 Pa, modul pružnosti v tahu povrchové laminy proprie 400 Pa, konstrukční tlumení 116.52 s⁻¹ a materiálové tlumení 0.0003 s.



Obr.60 Vypočtené posuvy v osách x a y jednotlivých vyhodnocovaných bodů pro modul pružnosti v tahu epitelu 10 000 Pa

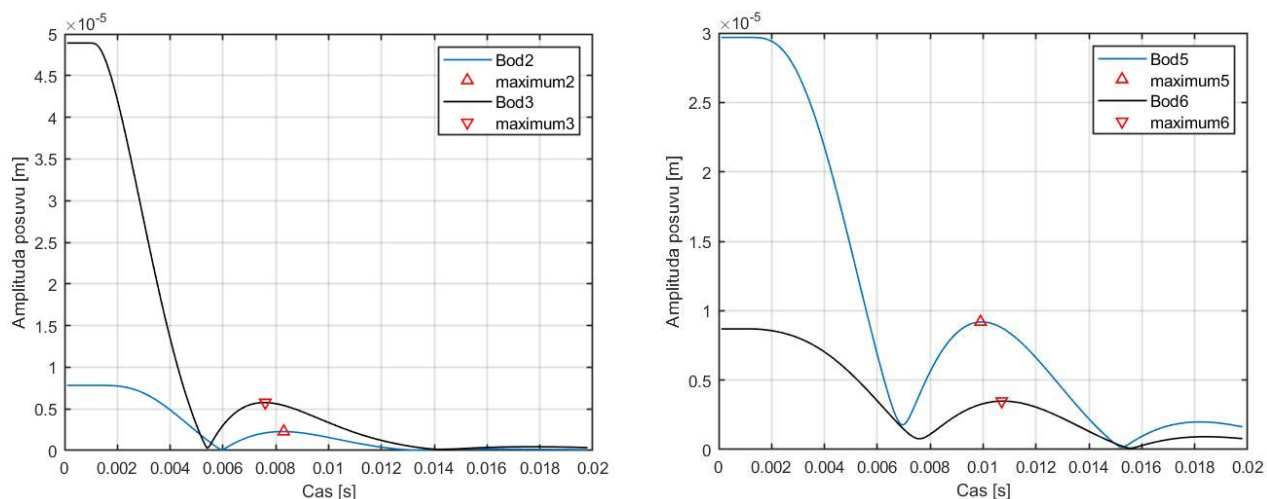
U bodů 2-3 jde dle obrázků téměř o podélné kmitání, přičemž se přes body 4-5 pohyb transformuje na eliptický pohyb.

Na následujícím obrázku číslo 61 jsou vidět výsledky pro modul pružnosti v tahu povrchové laminy povrchové proprii 400 Pa, modul pružnosti v tahu epitelu 5000 Pa, konstrukční tlumení 19.02507 s^{-1} a materiálové tlumení 0.00027960 s .



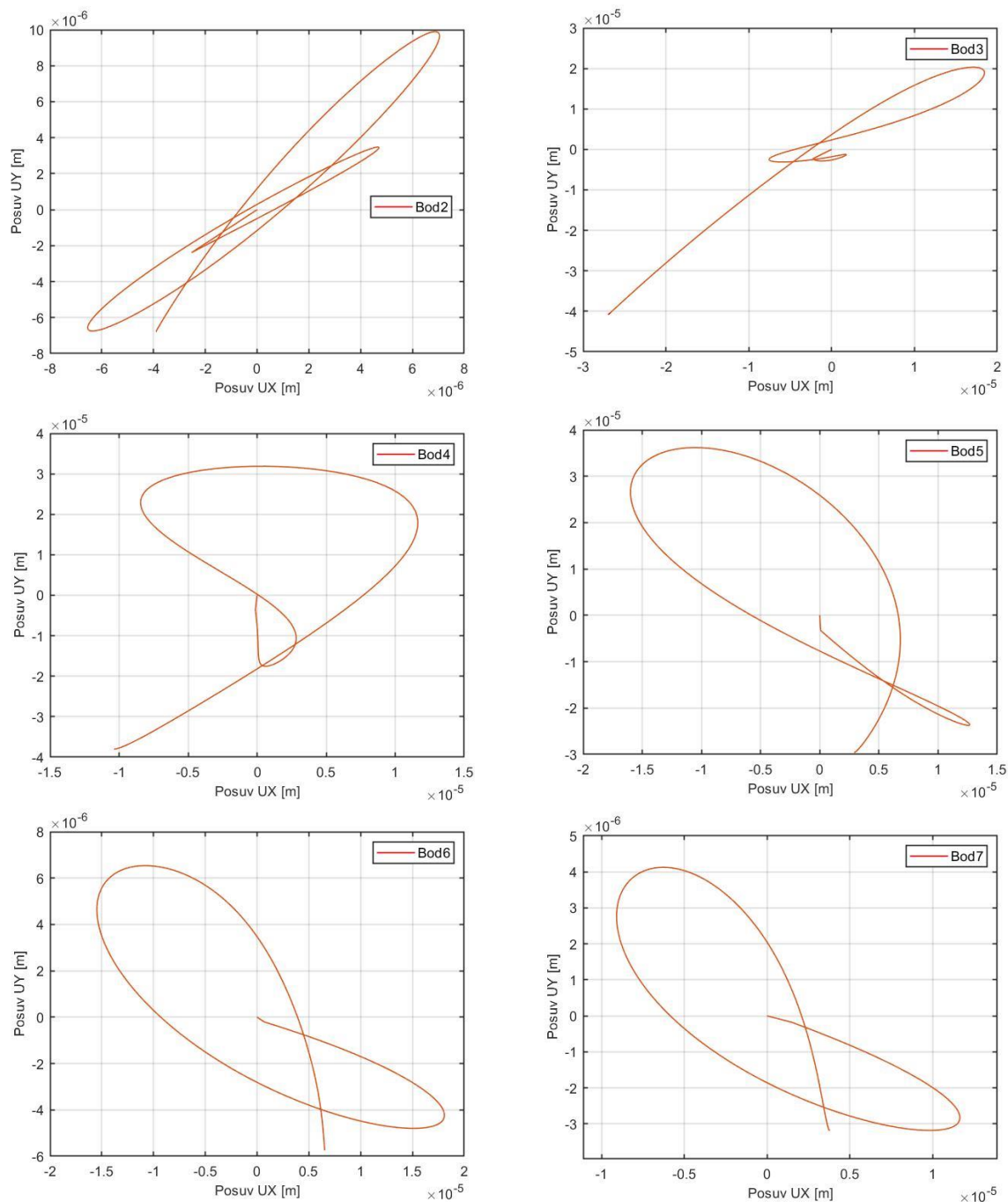
Obr.61 Amplitudy posuvů pro bod 2 a bod 3 vlevo, bod 5 a bod 6 vpravo s označenými maximy pro nejmenší tlumení

Na následujícím obrázku číslo 62 jsou vidět výsledky pro modul pružnosti v tahu povrchové laminy proprii 400 Pa, modul pružnosti v tahu epitelu 5000 Pa, konstrukční tlumení 168.4111 s^{-1} a materiálové tlumení 0.00119602 s .



Obr.62 Amplitudy posuvů pro bod 2 a bod 3 vlevo, bod 5 a bod 6 vpravo s označenými maximy pro největší tlumení

Zde je vyobrazen pohyb bodu 2,3,4,5,6 a 7 na po sobě jdoucích grafech v matlabu (znázorněno na obrázku 63). Následující varianta je pro modul pružnosti v tahu povrchové laminy proprii 400 Pa, modul pružnosti v tahu epitelu 5000 Pa, Konstrukční tlumení 19.02507 s^{-1} a materiálové tlumení 0.00027960 s, jde tedy o variantu s nejmenšími parametry proporciálního tlumení.



Obr.63 Vypočtené posuvy v osách x a y jednotlivých vyhodnocovaných bodů pro nejmenší tlumení

U bodů 2-3 jde dle obrázků téměř o podélné kmitání, přičemž se přes body 4-5 pohyb transformuje na eliptický pohyb. Na rozdíl od předešlých případů jsou zde daleko větší amplitudy.

10 ZÁVĚR

Cílem práce bylo na modelu hlasivky provést analýzu vlivu materiálových parametrů jednotlivých vrstev tkáně hlasivek, zejména pak povrchové laminy proprii na šíření slizniční vlny. V rešeršní části této práce je nejdříve uveden stručný přehled současných přístupů při výpočtovém a experimentálním modelování šíření slizniční vlny.

V úvodu praktické části práce je uveden výpočet pro rychlost šíření podélných vln, příčných vln, rayleighových povrchových vln a rychlost šíření ohybových vln dle analytických vztahů z literatury pro materiál povrchové laminy proprii. Výsledky ukazují, že rychlost podélných příčných vln a rychlost ohybových vln pro největší moduly pružnosti v tahu a nejvyšší frekvence se nejvíce blíží hodnotám uváděným v literatuře, kde se rychlosti pohybují v rozmezí od 2.1-10 m/s. Vztahy, podle kterých se počítá ovšem nemohou dostatečně vystihnout skutečnou rychlost šíření slizniční vlny u lidských hlasivek, protože hlasivka má vrstevnatou strukturu a její geometrie se neblíží žádnému ideálnímu tělesu, pro které jsou analytické vztahy odvozeny.

Dále byla provedena modální analýza rovinného modelu lidské hlasivky (Schererova M5 geometrie) pomocí metody konečných prvků v programu ANSYS. Nejdříve byla testována hustota sítě, kde byla po testech vybrána síť s 4027 prvky. Bylo počítáno prvních patnáct vlastních frekvencí. První vlastní frekvenci odpovídá tvar kmitu hlasivky nahoru a dolů a druhé vlastní frekvenci odpovídá tvar kmitů hlasivky doleva a doprava. V práci jsou uváděny varianty pro dvě hodnoty modulu pružnosti v tahu povrchové laminy proprii, a při srovnání těchto variant lze vidět, že vycházejí stejné tvary kmitů a vlastní frekvence při zvýšení modulu pružnosti povrchové laminy proprii rostou. Vypočtené hodnoty vlastních frekvencí odpovídají fyziologickým hodnotám frekvence kmitání lidských hlasivek uváděným v literatuře.

Dalším bodem práce byla analýza šíření slizniční vlny pomocí přechodové analýzy jako odezva hlasivky na rázové buzení silou na spodní části hlasivky. Nejdříve byl proveden test vlivu časového kroku. Z uvedených výsledků je patrné, že mezi jemnějšími variantami (0.0001 s a 0.00001 s) není příliš znatelný rozdíl, a to v žádném z vyšetřovaných bodů. Avšak pro hrubší časový krok (0.0005 s) se už v grafech pro všechny body vyskytují větší odchylky. V práci je tedy použit časový krok $\Delta t = 0.0001$ s.

V práci byl zkoumán vliv změny materiálových parametrů tkáně hlasivek na rychlost šíření a amplitudu slizniční vlny. Jak rychlost, tak amplituda byla vyšetřována pro zvolené body na povrchu hlasivky. Nejdříve byl analyzován vliv modulu pružnosti v tahu povrchové laminy proprii. Vyhodnocováno bylo několik variant modulu pružnosti, přičemž nejlepší výsledky byly dosaženy pro modul pružnosti v tahu 100 Pa, kde rychlost dosahovala mezi body 2-3, 2.0159 m/s a mezi body 5-6 1.2386 m/s. Pro tuto hodnotu modulu pružnosti docházelo také k šíření slizniční vlny nejdále po horním okraji hlasivek, vlna byla nejvýraznější a nejlépe odpovídala pohybu slizniční vlny pozorovaného u skutečných hlasivek. Pro variantu modulu pružnosti v tahu povrchové laminy proprii 1600 Pa pak vyšla rychlost mezi body 2-3 2.7913 m/s, ale pro body 5-6

docházelo ke kmitání téměř ve fázi a slizniční vlna se tak mezi těmito body prakticky nešířila. Amplituda slizniční vlny se snižuje se zvyšujícím se modulem pružnosti v tahu povrchové laminy proprii ve všech bodech a mezi nejtuzší a nejměkčí variantou je rozdíl o téměř celý řád. Rychlosti se, naopak ze zvyšujícím modulem pružnosti povrchové laminy proprii, zvyšují.

Dále byl analyzován vliv modulu pružnosti v tahu epitelu. Co se rychlosti týče, tak je zde mnohem znatelnější nárůst rychlosti mezi body 2-3, oproti rychlosti mezi body 5-6. Pro modul pružnosti 10 000 Pa zde dosahuje rychlost hodnoty 3.0239 m/s a mezi body 5-6 hodnoty 2.2295 m/s. Pro nejvyšší hodnotu modulu pružnosti v tahu epitelu (25 000 Pa) je rychlost mezi body 2-3 6.0478 m/s a mezi body 5-6 dosahuje hodnoty 2.7869 m/s. Co se týče amplitudy, tak se opět se zvyšujícím se modulem pružnosti v tahu snižuje, ale na rozdíl od varianty s modulem pružnosti v tahu povrchové laminy proprii zde není pokles tak výrazný.

Nakonec byl vyšetřován vliv parametrů proporcionálního tlumení na šíření slizniční vlny. Z vypočtených výsledků můžeme vidět, že rychlost šíření slizniční vlny roste se zvyšujícími se parametry proporcionálního tlumení. Což je způsobeno patrně tím, že pro větší hodnoty tlumení se hůře šíří slizniční vlna po povrchu hlasivky a hlasivka spíše kmitá jako celek a jednotlivé body na povrchu tak kmitají více ve fázi. Co se amplitudy týče, tak se opět ve všech bodech snižuje se zvyšujícím se tlumením. Rovněž je zde mezi nejméně tlumenou variantou a nejvíce tlumenou variantou rozdíl téměř o celý řád podobně, jako tomu je u varianty s měnícím se modulem pružnosti v tahu povrchové laminy proprii.

Z vyhodnocených trajektorií pohybu jednotlivých bodů je vidět, že u všech počítaných variant je u bodů 2-3 znát, že se jedná téměř o podélné kmitání a u bodů 4-5-6 se pohyb transformuje na přibližně eliptický pohyb. V jednotlivých variantách se liší velikosti amplitud a tvar elipsy pro body 4, 5 a 6 (větší či menší natažení/zploštění elipsy v ose x).

Z výsledků této práce vyplývá, že bude vhodnější použít nižší hodnoty moduly pružnosti v tahu povrchové laminy proprii v modelech s interakcí s proudem vzduchu, protože je zde mnohem výraznější šíření slizniční vlny lépe odpovídající skutečnému chování lidských hlasivek.

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ŠVEC, J. G. *Studium mechanicko-akustických vlastností zdroje lidského hlasu*. Disertační práce, Univerzita Palackého v Olomouci. 1996,
- [2] ŠVARC, M. *Tvorba konečně prvkových modelů lidského vokálního traktu a prostoru okolo hlavy na základě dat z počítačové tomografie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 59 s. Vedoucí Ing. Pavel Švancara, Ph.D.
- [3] TOMEČEK, Vojtěch. *Využití metody konečných prvků pro modelování šíření hlasu vokálním traktem a okolo hlavy člověka*. Brno, 2013. 73 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Švancara, Ph.D.
- [4] PAVLICA, O. *Výpočtové modelování interakce kmitajících hlasivek s proudem vzduchu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 108s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Švancara, Ph.D.
- [5] Švec, J.: *Studium mechanicko-akustických vlastností zdroje lidského hlasu*, disertační práce, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci, 1996(ewald pistala)
- [6] Hruža, V.: *Modelování funkce hlasivek pomocí MKP*, disertační práce, Fakulta strojního inženýrství, VUT Brno, 2007
- [7] Lan, H.: *An Investigation into the Dynamic Response of Vocals Folds*, Diploma Thesis, Auckland University of Technology, Auckland 2006
- [8] Story, B., Titze, I.: *Voice simulation with a body-cover model of the vocal folds*, Journal Acoust. Soc. Am. 97 (2), February 1995
- [9] Suh, J., Frankel, S: *Dumerical simulation of turbulence transitiv and sound radiation for flow through a rigid glottal model*, Journal Acoust. Soc. Am., Vol. 121, No. 6, June 2007
- [10] Horaček, J., Kozel, K., Punčochařova, P., Furst, J.: *Unsteady numerice computation of airflow through vocal folds*, ICVPB,Tampere, Finland, 6-9 August, 2008
- [11] KLIMA, J.: *Výpočtové modelování funkce lidských hlasivek*, diplomová práce, Fakulta strojního inženýrství, VUT Brno, 2008.
- [12] ŠVANCARA, P., HORÁČEK, J. *Numerical modelling of effect of tonsillectomy on production of Czech vowels*. Acta Acustica united with Acustica 92, 681-688. 08/2006. 8 s.
- [13] ŠVANCARA, P., TOMEČEK, V., HORÁČEK, J. a ŠVEC, J. *Finite element modelling of sound pressure around the human head during phonation*. In: Engineering mechanics 2013. Svratka: Ústav termomechaniky, AV ČR v.v.i., 2013. 7 s., s. 157-158. ISBN: 978-80-87012-46- 8.

- [14] ARNELA, M., GUASCH, O., ALÍAS, F. *Effects of head geometry simplifications on acoustic radiation of vowel sounds based on time-domain finite-element simulations*. GTM-Grup de recerca en Tecnologies Me`dia, La Salle, Universitat Ramon Llull, C/Quatre Camins 2, Barcelona 08022, Catalonia, Spain. 2013. 2946-2954 s.
- [15] DANIEL, V., MICHAEL D., ULRICH, E., ANXIONG, Y., ERCAN, G., *Objective detection and quantification of mucosal wave propagation. Department of Phoniatrics and Pediatric Audiology, University Hospital Erlangen, Bohlenplatz 21, D-91054 Erlangen, Germany*
- [16] FARIBORZ ALIPOUR, DAVID A. BERRY, INGO R. TITZE: A _finiteelement model of vocal-fold vibration, *Journal Acoust. Soc. Am.*, Vol. 108, No.6, December 2000.
- [17] SCOTT L. THOMSON, MONGEAU L., STEVEN H. FRANKEL: Aerodynamic transfer of energy to the vocal folds, *Journal Acoust. Soc. Am.*, Vol. 118, No.3, September 2005.
- [18] BREPTA, R., PUST, L., TUREK, *mechanické kminátní*, 1.vydání 592s Sobolátes, ISBN 80-901684-8-5
- [19] ANSYS manual, Ansys Inc.
- [20] Speech processing – introduction of speech and hearing. Poslední změna 15.12.1997. Dostupné z: <http://cobweb.ecn.purdue.edu/~ee649/notes/figures/>
- [21] ŠRAM, F., ŠVEC, J., HAVLÍK, R., FRIČ, M. Poruchy hlasu. Iatrike Techne 1/2003: LVI-LXII (2003)
- [22] Švec, J.: Studium mechanicko-akustických vlastností zdroje lidského hlasu, disertační práce, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci, 1996
- [23] Reinke FB. Untersuchungen über das menschliche Stimmband. *Fortschr Med München* 1895;13:469–78.
- [24] Standring S, Gray H. *Gray's anatomy: the anatomical bases of clinical practice*. 39th ed. Edinburgh: Elsevier Churchill Livingstone; 2005.
- [25] Schuenke M, Schulte E, Schumacher U, Thieme RJ. *Atlas of anatomy (neck and internal organs)*. Stuttgart, New York: Thieme; 2006.
- [26] Titze IR. *The myoelastic aerodynamic theory of phonation*. Iowa City, USA: National Centre for Voice and Speech; 2006
- [27] Gray S, Hirano M, Sato K. Molecular and cellular structure of vocal fold tissue. In: Titze IR, editor. *Vocal fold physiology: frontiers in basic science*. San Diego: Singular Publishing Group; 1993. p. 1–35.

[28] Suganthy J, Deepak VF. Plastination using standard S10 technique – our experience in Christian Medical College, Vellore. *J Anat Soc India* 2012;61(2):44–7.

[29] Horáček J, Šidlof P, Švec JG. Numerical simulation of self-oscillations of human vocal folds with Hertz model of impact forces. *J Fluids Struct* 2005;20:853–69.

[30] Vampola T, Horáček J, Klepáček. Computer simulation of mucosal waves on vibrating human vocal folds. In: Institute of Anatomy, 1st Faculty of Medicine, Charles University in Prague, Prague, Czech Republic

[31] http://voiceproblem.org/images/vfscarring_normal_large.jpg. (nedatováno). Načteno z www.voiceproblem.com.

[32] Yio-Wha Shau, Chung-Li Wang, Fon-Jou Hsieh, Tzu-Yu Hsiao. *Noninvasive assessment of vocal fold mucosal wave velocity using color doppler imaging*, In: National Taiwan University Taipei, Taiwan.

[33] Christopher R. Krausert, Aleksandra E. Olszewski, Lindsay N. Taylor, James S. McMurray, Seth H. Daiey and Jack J. Jiang, *Mucosal wave measurement and visualization*

[34] Bowen Jing, Zhengton Ge, Liang Wu, Supin Wang, Mingxi Wan. *Visualizing the mechanical wave of vocal fold tissue during phonation using electroglottogram-triggered ultrasonography*. Laboratory of Biomedical Information Engineering of Ministry of Education, School of Life Science and Technology.

[35] S. Pravin Kumar, Jan G. Švec, *Kinematic model for simulating mucosal wave phenomena on vocal folds*, Voice Research lab, Department of biophysics, Faculty of Science, Palacký University, Olomouc, Czech Republic

[40] MICHÁLEK, M. C. *Výpočtové modelování vlivu geometrie a modelu materiálu na kmitání lidských hlasivek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 78 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Švancara, Ph.D.

[41] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 400 s.il.;21 cm. ISBN 978-80-01-04347-9

[42] Viktorov, I.A. (2013) "Rayleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications", Springer; Reprint of the original 1st 1967 edition by Plenum Press, New York. ISBN 978-1489956835

[43] HÁJEK, P.; ŠVANCARA, P.; HORÁČEK, J.; ŠVEC, J. Influence of Tissue Changes in Superficial Lamina Propria on Production of Czech Vowels. In *Engineering Mechanics 2019*, Praha: Institute of Thermomechanics of the Czech Academy of Sciences, 2019. s. 141-144. ISBN: 978-80-87012-71-0. ISSN: 1805-8248.

12 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
M	Matice hmotnosti	kg
K	Matice tuhosti	N/m
\ddot{u}	Uzlový vektor zrychlení	m/s ²
u	Uzlový vektor posuvu	m/s
t	Čas	s
Φ_i	Vlastní vektor	-
ω_i	Vlastní úhlová frekvence	Rad/s
f_i	Vlastní frekvence	Hz
$[M]$	Strukturální matice hmotnosti	kg
$[C]$	Strukturální matice tlumení	s
$[K]$	Strukturální matice tuhosti	N/m
$\{\ddot{u}\}$	Uzlový vektor zrychlení	m/s ²
$\{\dot{u}\}$	Uzlový vektor rychlosti	m/s
$\{u\}$	Uzlový vektor výchylek	m
$\{F^A\}$	Vektor budících sil	N
α	Konstrukční tlumení	s ⁻¹
β	Materiálové tlumení	s
C_L	Rychlost podélných vln	m/s
C_T	Rychlost příčných vln	m/s
C_B	Ohybové vlny	m/s
C_R	Rayleighovy vlny	m/s
m'	Hmotnost jednotkové délky tyče	Kg/m